

Trabajo de Fin de Máster

Ingeniería Industrial

Diseño de un edificio residencial de gran altura mediante construcción modular eficiente

MEMORIA

Autor: Taron Hamkhiyan
Director: Pablo Pujadas Álvarez
Convocatoria: Septiembre de 2019



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial de Barcelona



Resumen

Este documento trata de un proyecto que tiene por objetivo definir un sistema constructivo prefabricado que sea viable y eficiente en el continuo crecimiento de las ciudades. Dicho sistema tiene que ser capaz de dar respuesta a los diferentes tipos de demanda constructiva de edificios. Es decir, ser adaptable tanto para los edificios residenciales de baja, media y gran altura, como oficinas, hoteles u otros.

Para ello, se ha investigado y analizado las múltiples formas de prefabricación tanto en función de la tecnología constructiva como en el material utilizado. Dichos sistemas se compararon con la construcción tradicional. Diferentes factores, tales como: costes, mano de obra, tiempo, contaminación, etc., fueron analizados. Para comparar un sistema constructivo con otro, se utilizó como sistema de referencia la metodología constructiva clásica, es decir, in situ.

Los resultados obtenidos demuestran, que la evolución y la eficiencia de la construcción pasan necesariamente por la prefabricación y la modulación de la construcción. Entre las soluciones analizadas, queda evidente la versatilidad y el potencial de la construcción modular volumétrica, más concretamente, los módulos PPVC de acero (*Prefabricated Prefinished Volumetric Construction*). Se les conoce de este modo ya que son montados en el taller prácticamente en su totalidad y son tan solo acoplados unos a otros en la obra. Todas las canalizaciones e instalaciones son incluidas y montadas dentro del mismo módulo, por lo que lo único que queda es *Plug and Live*. Dicho sistema es válido para cualquier tipo de construcción, ya sea viviendas unifamiliares como edificios residenciales de elevada altura. La construcción volumétrica funciona muy bien cuando se tratan de edificio de pocas plantas, pero para los edificios de gran altura son requeridas técnicas que estabilicen el conjunto modular y resistan las cargas laterales. Por ello, la solución pasa por levantar un núcleo resistente de acero, alrededor del cual irán acoplados los módulos prefabricados.

La segunda parte del proyecto trata de diseñar completamente (estructura, revestimiento e instalaciones) un módulo PPVC de acero y su posterior implementación en la construcción de un edificio residencial de 20 plantas, dotando dicho edificio de la capacidad de ser montables y desmontables completamente. El coste directo de fabricación de un módulo tipo es de 21.260,00 €.

Por último, según los criterios de eficiencia se ha dotado al edificio de instalaciones de climatización, ventilación y generación de ACS completamente centralizados. Se han realizado los cálculos de dimensionado del sistema eléctrico, de una caldera de biomasa central, de captadores solares térmicos que sean capaces de proporcionar el 60% de la demanda de ACS, etc.

Sumario

SUMARIO	4
1. GLOSARIO	7
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Origen del proyecto	9
2.2. Objetivos del proyecto	9
2.3. Alcance del proyecto	9
3. CONTEXTO	10
3.1. Necesidad de la tecnología	10
3.2. Industrialización de la construcción	12
3.2.1. Definiciones	12
3.2.2. Tipologías de construcción modular	13
3.2.3. Criterios de diseño y comercialización	14
4. REVISIÓN DEL CONOCIMIENTO: SISTEMAS PREFABRICADOS	15
4.1. Sistemas modulares volumétricos	15
4.1.1. Sistema volumétrico en hormigón	16
4.1.2. Sistemas volumétricos en acero	16
4.2. Sistemas estructurales panelizados	19
4.2.1. Sistemas panelizados en hormigón	20
4.2.2. Sistema panelizado en acero	21
4.3. Sistema estructural prefabricado	22
4.3.1. Sistema estructural en hormigón	22
4.3.2. Sistema estructural en acero	24
4.3.3. Revestimiento de la estructura: fachada prefabricada	27
5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS	30
5.1. Finalidad del análisis comparativo	30
5.2. Definición de la metodología	30
5.3. Análisis	33
5.3.1. Aspectos económicos	33
5.3.2. Aspectos ambientales	40
5.3.3. Aspectos sociales	47
5.3.4. Aspectos estructurales	50
5.4. Comparativa: Elección del sistema constructivo	55
5.4.1. Ventajas y desventajas de la implementación modular volumétrica en acero	58
5.4.2. Construcción multiplanta con PPVC en acero	59

5.4.3.	Acción estructural.....	59
5.4.4.	Definición de los métodos constructivos	62
5.4.5.	Desafíos y problemática constructivos	65
5.4.6.	Selección de tipo de módulo volumétrico de acero	67
6.	PROPUESTA DE DISEÑO DEL EDIFICIO DE GRAN ALTURA	68
6.1.	Diseño del módulo volumétrico	68
6.1.1.	Análisis y definición del módulo prefabricado.....	70
6.1.2.	Apilamiento vertical de módulos.....	77
6.1.3.	Diseño de las uniones.....	81
6.1.4.	Cerramientos	87
6.2.	Diseño de la estructura del edificio de gran altura	94
6.2.1.	Diseño geométrico de la planta.....	94
6.2.2.	Análisis y definición del núcleo resistente	95
6.2.3.	Cimentación.....	103
6.2.4.	Diseño de la losa de cimentación.....	104
6.2.5.	Calculo de la armadura a flexión.....	107
6.3.	Dimensionamiento de las instalaciones	109
6.3.1.	Climatización y ventilación centralizadas	109
6.3.2.	Sistema eléctrico del edificio	119
6.3.3.	Generación ACS centralizada.....	125
6.3.4.	Generación ACS termosolar	134
6.3.5.	Diseño del paso de las instalaciones	141
6.4.	Transporte	144
6.5.	Proceso constructivo	146
6.6.	Estudio económico	152
	CONCLUSIONES	159
	AGRADECIMIENTOS	161
	BIBLIOGRAFÍA	162
	ANEXOS I ESTRUCTURA	166
	Comprobación tensional de los perfiles del módulo	166
	Comprobación tensional de los perfiles del núcleo.....	190
	Cálculo de las uniones atornilladas	197
	Cálculo de basa de soporte	201
	Cálculo de cimentación.....	204
	Reacciones en cimentación	204
	Dimensionamiento de la armadura.....	207

Comprobaciones a esfuerzo cortante.....	209
Comprobaciones a punzonamiento.....	210
Comprobaciones a condiciones de fisuración del hormigón.....	210
ANEXOS II CERRAMIENTOS	213
Particiones exteriores	213
Particiones interiores	215
ANEXOS III INSTALACIONES	217
Climatización y ventilación	217
Cálculo eléctrico.....	219
Cálculo ACS.....	225
Calculo ACS termosolar.....	229
ANEXOS IV PLANOS	233
Plano de módulo volumétrico.....	233
Plano de climatización	233
Plano de ventilación.....	233
Plano de ACS	233

1. Glosario

ACS: Agua caliente sanitaria

AFS: Agua fría sanitaria

BCA: Building and Construction Authority, gobierno de Singapur.

BEDEC: Banco de datos de elementos constructivos.

CTE: Código técnico de edificación

DAU: Documento de adecuación al uso.

Diafragma: Pieza estructural rígida que puede soportar el esfuerzo cortante al estar cargado en una dirección paralela a un plano. También llamado tímpano.

Diafragma horizontal: Forjado rígido horizontal que transmite y distribuye las fuerzas laterales a paredes verticales de arriostramiento, etc.

EHE: Instrucción española del hormigón estructural.

FSS: Del inglés *Framing Structural System*, sistema de estructura de “esqueleto”.

GRC: Del inglés, *Glass Reinforced Concrete*, hormigón reforzado con vidrio.

IPS: Del inglés, *Individual Panel System*, sistema de paneles individuales.

ITeC: Instituto en tecnologías de construcción de Catalunya.

K_c: Rigidez de los componentes verticales.

K_{bf}: Rigidez de los elementos horizontales a nivel del suelo.

K_{bc}: Rigidez de los elementos horizontales a nivel del techo.

K_j: Rigidez de las juntas.

MBI: Modular Building Institute.

PMC: Del inglés *Permanent Modular Construction*, construcción modular permanente.

PPVC: Del inglés *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction*.

RB. Del inglés *Reubicable Building*, construcción reubicable.

Shear key: Elemento estructural diseñado para resistir esfuerzos laterales.

SHS: Del inglés *Square Hollow Section*, sección cuadrada hueca.

UTA: Unidad de tratamiento de aire.

2. Introducción

2.1. Origen del proyecto

Este proyecto nace a partir de la idea y la necesidad de buscar la eficiencia en la construcción. La construcción de una vivienda bioclimática fue la primera posible solución a la que se llegó, pero no es suficiente en las ciudades cada vez más pobladas y más cambiantes.

A raíz de una charla con los compañeros del departamento de Calidad de Producto, de ITeC, nació el interés hacia la industrialización de la construcción y con ella nació la motivación del proyecto. Esto llevó a pensar que realmente lo que hace falta es aumentar el dinamismo, la flexibilidad y la versatilidad de las técnicas constructivas, algo estancadas en las viejas metodologías. Dicha charla sirvió como hito a la hora de redirigir la idea inicial, de un edificio sostenible y bioclimático, a un edificio constructivamente eficiente.

2.2. Objetivos del proyecto

- El objetivo principal de este proyecto es definir una forma constructiva eficiente mediante las nuevas metodologías, comprobar su viabilidad constructiva y realizar una propuesta de diseño de un edificio residencial de gran altura.
- Para ello, se definen unos objetivos previos: investigar y analizar según los criterios estructurales y de sostenibilidad las nuevas metodologías constructivas disponibles en el mercado.
- Por último, investigar y analizar un sistema de instalaciones que cumpla con las condiciones de confort y ahorro energético. Además, elaborar una propuesta de proyecto de climatización, ventilación, ACS y electricidad.

2.3. Alcance del proyecto

- Estudio teórico previo de las metodologías y sistemas constructivos.
- Diseño y ejecución del bloque residencial. Mediciones y cálculos estructurales
- Diseño de servicios básicos, ACS, electricidad, climatización. Cálculo de la demanda, dimensionado, detalle de los equipos utilizados y planos de instalaciones.
- Aprovechamiento de energías renovables. Cálculo de la demanda, dimensionado, detalle de los equipos empleados principales y planos de instalaciones.
- Estudio económico del proyecto.

3. Contexto

3.1. Necesidad de la tecnología

El sector de la construcción es uno de los más antiguos de la humanidad y pese a ello es el sector que, por diversas razones, ha evolucionado poco o prácticamente nada en las últimas décadas en comparación con el sector industrial y de servicios.

- Actualmente, la economía global crece un 2,8% anual. Las empresas de los sectores que han sabido renovarse (comercio, industria de componentes, entre otros) crecen un 3,6% anual de media, mientras que el sector de la construcción tan sólo un 1% (Prat 2017).
- El porcentaje total de la construcción sobre el valor añadido bruto en la Unión Europea, desde el año 2004 a 2018 apenas ha cambiado. Se pasó de un máximo de 6,4% en el año 2008 al 5,6% para el pasado 2018. Es cierto que el retroceso se debió a una fuerte crisis económica, pero, aun así, después del sector de la agricultura, el sector de la construcción es el que menos valor genera. Muy lejos de los 19,6% del sector de la industria y el 73,3% del sector de servicios (Idescat 2019).
- La ineficiencia lleva asociado el impacto ambiental. El 50% de los residuos sólidos del planeta están provocados por el sector de la construcción, y más de un 30% del gasto energético (Prat 2017). El planteamiento sostenible no puede ser afrontado desde proyectos concretos. Tiene que ser global, vertical y político. La sostenibilidad de los productos e infraestructuras son claves para que el sector, tradicionalmente estancado, consiga dar un paso evolutivo hacia los nuevos métodos industrializados.
- Otro aspecto que se ha de tener muy en cuenta es la seguridad y salud. Aunque el sector de la construcción no presente el mayor índice de accidentes laborales, es el que más ha subido en los últimos años, 9,4%, a nivel nacional (INSSBT, O.A. 2018). Por tanto, es primordial revertir esta tendencia mediante procesos que minimicen los riesgos de los operarios.

El avance tecnológico va fuertemente ligado con la demanda del mercado en general. Los intereses del mercado, ya sea nacional o mundial, avanzan y cambian cada vez más deprisa y por ello exigen una respuesta rápida al conocimiento tecnológico. Por suerte, cada vez más, tanto los agentes sociales como económicos buscan un avance más eficiente y sostenible.

Por consiguiente, existe una gran tendencia mundial al aumento de la eficiencia de cualquier proceso considerado hoy en día. Dicha eficiencia comprende lo económico, energético, recursos materiales y humanos, optimización del tiempo y una clara apuesta por la sostenibilidad, que múltiples veces se ha demostrado no ser incompatible con los beneficios económicos, como es el caso de la construcción industrializada.

El creciente flujo migratorio, tanto de pueblos a ciudades como de unos países a otros, y de acuerdo con el aumento poblacional y a los cambios surgidos en las diferentes sociales, exigen buscar nuevas formas constructivas que sean de eficiente aplicación, es decir, rápidos, económicos y que proporcionen un confort interior de acuerdo con el nivel exigido por los países desarrollados. Las condiciones habitacionales pueden interpretarse como la representación del nivel de la calidad de vida de la población. Por otro lado, los países en vías de desarrollo y con una gran población, como lo son en su mayoría los países de América latina, África, y Asia, requieren con urgencia implantar tecnologías para construir viviendas sociales para las clases trabajadoras, de escaso ingreso económico.

Otro factor a tener en cuenta son los países que albergaran los grandes acontecimientos deportivos tales como, los Juegos Olímpicos o el Campeonato Mundial de fútbol. En este caso serán necesarios, a parte de las instalaciones deportivas, una gran cantidad de viviendas a bajo coste y de construcción rápida para albergar a todos los periodistas, atletas y visitantes. Además, la gran cantidad de edificios de servicios terciarios, como oficinas, para las sedes temporales de empresas patrocinadoras, periodísticas u otras, en estos países. Al terminar los eventos, si las empresas deciden desocupar el edificio, la administración pública podría desmantelarlo completamente gracias a la flexibilidad que otorga la construcción modular para su posterior traslado o reutilización o transformarlos en una residencia de estudiantes, por ejemplo.

En la construcción, se ha tratado de optimizar en cuestiones de tiempo y coste, por lo que no es de extrañar que la industria de los prefabricados se haya convertido en una opción muy atractiva. La prefabricación es el único modo industrial de acelerar masivamente la construcción de edificios. Por esto, surge la necesidad de proporcionar una orientación de las tecnologías o metodologías constructivas presentes, a rasgos generales. Por consiguiente, este proyecto pretende realizar un estudio y categorizar los diferentes sistemas de construcción modular de acuerdo con el sistema de producción industrializado y al material empleado.

3.2. Industrialización de la construcción

3.2.1. Definiciones

La industrialización de la construcción comienza con la modificación del proceso de construcción. Las fases de planificación y de ejecución tienen que ir una detrás de la otra, para edificar masivamente con calidad alta y en un plazo breve. Son todos los tipos de edificios que se someten a los mismos procesos por los que se caracteriza la construcción industrial donde son empleados elementos prefabricados.

Algunas definiciones;

Construcción prefabricada: Término general que hace referencia a cualquier proceso de fabricación de construcciones, o componentes de estos, fuera del emplazamiento “*off-site*” antes de instalarlos in situ. Definido por Bell & Southcombe, 2012.

Módulo prefabricado: Existe una diferencia entre lo que se entiende por un módulo prefabricado en países anglosajones o Norte de Europa y lo que se entiende en España. Por un lado, en los países como Estados Unidos, Reino Unido e incluso los de Sudeste Asiático, éste se entiende como un elemento tridimensional volumétrico prefabricado referente a la definición de *Construcción modular* de Swedberg C. Mientras que, en España, es una unidad estructural que se repite de manera regular, pueden ser tanto cajas volumétricas como paneles, fabricados fuera del emplazamiento, destinados a su ensamblaje en la obra.

Modular: Describe un método constructivo o proceso donde los módulos individuales son independientes o ensamblados juntos para formar una estructura mayor. Definido por MBI, 2011.

Construcción modular: Técnica constructiva en cual los módulos son fabricados en una fábrica con todas las instalaciones técnicas contenidas y a continuación transportadas al emplazamiento, listos para su ocupación. Definido por Swedberg C., 2007.

Sistema de edificación industrializado (IBS): Técnica constructiva emergida en Malasia en la primera década del 2000. Principalmente basada en la estandarización de los componentes de construcción, su fabricación en un entorno controlado (en o fuera del emplazamiento), el transporte, el posicionamiento y el ensamblado en una estructura con el mínimo trabajo adicional en la obra. Definido por Yunus, 2011.

Construcción Volumétrica Prefabricada y Pre-finalizada (PPVC): Se trata de un método de construcción mediante el cual los módulos volumétricos independientes (completos con acabados para paredes, suelos y techos) son fabricados y ensamblados en una instalación

de fabricación acreditada, de acuerdo con algún método de fabricación acreditado, luego son ensamblados en un edificio bajo construcción. Definido por BCA (*Building and Construction Authority*, gobierno de Singapur).

En la siguiente tabla, *Tabla 3.1: Clasificación de elementos prefabricados en la construcción*, elaborada a partir de diversas fuentes, se representan los sistemas portantes prefabricados en función del peso y material.

Sistema General	Sistema	Material de Producción
Sistema Modular Volumétrico (cajas)	Módulos de peso medio	Estructura de madera, acero de poco espesor o compuestos.
	Módulos de peso elevado (producidos en fábrica)	Hormigón armado
Sistema de Panel	Paneles de peso ligero y medio	Estructura de madera, acero de poco espesor o compuestos.
	Paneles de peso elevado (producidos en fábrica)	Hormigón armado
Sistemas de Estructuras	Estructuras de peso ligero	Madera, acero de poco espesor
	Estructuras de peso ligero y medio	Metales, plásticos reforzados, madera laminada
	Estructuras de peso elevado	Hormigón armado, aceros pesados

Tabla 3.1: Clasificación de elementos prefabricados en la construcción

En definitiva, la construcción modular es un proceso en el cual un edificio o partes de este son contruidos fuera de su emplazamiento, bajo las condiciones de fábrica estrictamente controladas. Los edificios son producidos en módulos que, cuando son unidos en su emplazamiento, reflejan el diseño y las especificaciones iniciales de la infraestructura. Estructuralmente, los edificios modulares son generalmente más resistentes que las construcciones tradicionales dado que cada módulo es desarrollado independientemente para soportar las dificultades del transporte y las labores de grúa sobre los cimientos. Una vez unidos y sellados, los módulos pasan a ser paredes integradas, un suelo y un techo.

3.2.2. Tipologías de construcción modular

Los Institutos de Construcción Modular (MBI, sus siglas en inglés) clasifican la construcción modular en dos categorías diferentes; construcción modular permanente (PMC, sus siglas en inglés) y construcción reubicable (RB, sus siglas en inglés), según su temporalidad.

Construcción Modular Permanente (PMC). Prefabricación de soluciones completas de módulos entregables para construcciones de carácter permanente. Los módulos PMC se

pueden integrar tanto en proyectos de construcción tradicional o realizar construcciones independientes únicamente con dichos módulos.

Construcción Modular Reubicable (RB). Se trata de un edificio parcial o completamente ensamblado, diseñados para ser reutilizados o recompuestos varias veces y transportados a diferentes emplazamientos. Se utilizan para escuelas, oficinas, clínicas médicas, centros de ventas y en cualquier aplicación en la que un edificio reubicable pueda satisfacer una necesidad de espacio temporal.

3.2.3. Criterios de diseño y comercialización

El criterio fundamental de diseño es que de la fábrica debe salir un sistema lo más acabado posible, buscando siempre grandes dimensiones, con las mínimas juntas y que facilite la máxima rapidez de montaje y una solidez constructiva del edificio resultante. El objetivo final es conseguir conjuntos integrados que se conviertan en soluciones estandarizadas. Esto permitiría obtener series importantes de piezas que optimicen el precio.

Debe destacarse que, aunque la construcción definitiva se referencie en un esquema modular, por limitaciones de fabricación o transporte, también se puede partir de la combinación de elementos lineales (pilares, vigas, pórticos) y superficiales (forjados, paneles) ensamblables que conformarán las celdas en obra, por lo tanto, se pasaría de unos elementos lineales (1D) o planos (2D) a unos volumétricos (3D). En cambio, algunas empresas entregan directamente el módulo completo de por sí, pudiendo incorporar de fábrica algunas de las instalaciones y otros acabados.

Las principales diferencias entre los sistemas modulares basados en elementos lineales y planos frente a los volumétricos pueden ser divididas en cuatro procesos:

- **Diseño:** los mecanismos de conexión entre componentes, como es evidente, adquieren más importancia en los sistemas lineales y planos.
- **Fabricación:** los sistemas lineales y superficiales requieren de menor especialización de industria que los volumétricos. Es decir, los mismos fabricantes que comercializan otros elementos prefabricados pueden acometerla.
- **Transporte:** los sistemas volumétricos son los más difíciles de transportar y por ende más caros. Mientras que los pilares y vigas y paneles planos permiten la optimización del transporte al ser piezas más sencillas y ligeras.
- **Ejecución:** la ejecución es más simple y rápida para los sistemas volumétricos ya que requieren menor número de operación a pie de obra.

4. Revisión del conocimiento: Sistemas prefabricados

4.1. Sistemas modulares volumétricos

Sistemas modulares volumétricos o enfoque integral. Es el sistema basado en la construcción a partir de módulos completos, unidades estructurales 3D. Generalmente se utilizan estructuras de acero con secciones de poco espesor, prefabricados de hormigón, paneles de madera contralaminada o una combinación de estos, resultando un mayor grado de industrialización ya que las tareas de obra se reducen al mínimo posible (ensamblaje, remates, etc.).

Los módulos resultantes son unidades volumétricas en los que los suelos, las paredes y los techos, con sus respectivas instalaciones, constituyen una única unidad. Se trata de elementos autoportantes y su diseño prevé la acumulación de los mismos en altura pudiendo soportar cargas gravitatorias del conjunto. Algunos de estos módulos volumétricos disponen de elementos de mayor sección para asumir las funciones estructurales y así garantizar la estabilidad global del edificio respecto a cargas horizontales ejerciendo de núcleo rígido. Además, están las unidades modulares no portantes o cápsulas. Este tipo de módulo se utiliza como unidad de relleno y es colocado en otro sistema estructural.

Otro sistema para generar esos módulos volumétricos es la utilización de perfiles metálicos generando la estructura de caja para terminar cerrando con elementos no estructurales de tal manera que se consigue aligerar el peso total del módulo.

La construcción con los prefabricados volumétricos se puede encontrar de dos tipologías distintas. La primera trata de unidades puramente estructurales, que ayudan a definir los espacios del edificio. La segunda, en cambio, es la conocida construcción modular volumétrica. Ésta, ha evolucionado considerablemente en la última década, dando lugar a *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC)*, es decir, Construcción Volumétrica Prefabricada y Prefinalizada para edificios ya sea de obra nueva o remodelación.

Unidades técnicas. Consisten en módulos sencillos para conformar espacios como la cocina, el baño o el garaje, pudiendo incorporar instalaciones como las de fontanería, electricidad, mobiliario, sanitarios, domótica, colectores solares en cubierta, etc. con sus respectivos acabados. Una vez terminados, se llevan a obra donde su montaje es relativamente fácil y ágil, pues van acoplados entre los forjados de la estructura del edificio y únicamente se requieren realizar las conexiones de agua, luz, desagüe, ventilación, etc.

4.1.1. Sistema volumétrico en hormigón

Es un sistema enfocado más a la construcción de viviendas unifamiliares, debido al peso de cada elemento, no permite la construcción de altura. En edificios de media altura o superior, este sistema no puede garantizar un correcto funcionamiento de la estabilidad global y los módulos que se situarían en la parte más bajas tendrían que alcanzar unas secciones demasiado grandes para la optimización de fabricación, transporte y montaje. Se trata de módulos abiertos, es decir, que uno por sí solo no conforma una técnica y habitable. La unión de estos elementos se realiza por medios mecánicos.

Para las construcciones de viviendas individuales o de baja altura, estos módulos proporcionan mayor versatilidad. Éstas se realizan a partir de una serie de módulos que configuran los distintos espacios habitables (habitaciones, salón, etc. además de terrazas, huecos de ascensor, escaleras, etc.). Una de las grandes ventajas que ofrece es la posibilidad de proveer conexiones que permitan futuras ampliaciones, ya sea en planta o en altura.

Cada módulo se diseña con el conjunto de instalaciones pertinentes para su posterior conexionado en obra con el resto de los módulos y las instalaciones generales del edificio, (colector de residuales y pluviales, acometidas de agua, electricidad, gas, etc.). En obra se deben realizar los trabajos previos de replanteo y construcción de la cimentación. El caso más común es la utilización de una losa de cimentación debido al tamaño del edificio resultante y mediante este sistema se permite un mejor funcionamiento estructural y conexionado de los módulos.

Uno de sus puntos fuertes es que el aislamiento termoacústico es considerable sin necesidad de lana de roca u otros aislantes. Y, por otro lado, la protección contra vibraciones también es significativa puesto que al tratarse de módulos independientes no comparten elementos estructurales como el forjado o los muros dificultando la transmisión de ruido por vibración.

Por el contrario, como se ha ido mencionando, los módulos volumétricos de hormigón armado se caracterizan por su elevado peso, por lo tanto, el transporte es uno de los hándicaps de esta tecnología. Aunque sea muy versátiles, determinados diseños arquitectónicos no son adaptables mediante módulos. Y, por último, como contrapartida, el número de módulos a fabricar ha de ser elevado para que sea económicamente rentable.

4.1.2. Sistemas volumétricos en acero

El rango actual de aplicaciones de construcción modular se encuentra en edificios de tipo celular como hoteles, residencias de estudiantes, alojamientos militares y viviendas sociales, donde el tamaño del módulo es compatible con los requisitos de fabricación y transporte.

Existen dos formas genéricas de construcción modular en acero, que afectan su rango de

aplicación y las formas de construcción que pueden ser diseñados en función del medio a través del cual se transfiere la carga:

- Módulos de paredes portantes de carga. Aquellos en los que las cargas se transfieren a través de las paredes laterales de los módulos.
- Módulos soportados en esquinas. Aquellos en los que las cargas se transfieren a través de las vigas a los perfiles colocados en las esquinas.

Un módulo típico es de 3,3 metros a 3,6 metros de ancho (dimensiones internas) y de 6 metros a 9 metros de largo y suele tener una superficie de 25 a 35 m².

Al contrario de lo que pasa con los sistemas en hormigón, en ese caso el aislamiento termoacústico inicialmente es nulo, a no ser que se empleen módulos de paredes portantes con las paredes tipo sándwich, por consiguiente, por tanto, se deberá dotar al módulo de una piel que cumpla con esos requisitos termoacústicos.

El método usado más común para construir estructuras modulares de baja altura es el apilamiento. Similar a bloques constructivos, unidades modulares portantes pueden ser apilados y unidos para formar una estructura completa.(Lawson, Ogden, and Bergin 2012).

Las estructuras que son inferiores a tres - cuatro plantas de altura que usan módulos pueden transmitir las cargas laterales a través de elementos rígidos, como la sucesión de pórticos o la utilización de paneles, hasta la cimentación debido a que los esfuerzos que se generan en edificios pequeños son asumibles con estos sistemas. Una estructura que exceda esa altura normalmente requerirá un sistema lateral de arriostramiento. Es común para las estructuras de gran altura usar un sistema estructural de acero o núcleos hormigón para resistir la carga lateral aumentada.

En este sistema modular, la estructura consta de muchos módulos 3D, que se apilan verticalmente y se unen horizontalmente para crear el edificio. Sobre la base del estudio de las rutas de carga para este tipo de estructura, el sistema 3D se puede dividir en dos subcategorías principales, que son los sistemas de “portantes pared” y “portantes de esquina” (Lawson and Richards 2010).

Sistemas de paredes portantes de carga – módulos apilables

Los módulos portantes que usan las paredes exteriores para transmitir las cargas gravitatorias son los llamados módulos con paredes portantes de carga. Los módulos son apilados unos encima de otros, y las paredes laterales son alineadas verticalmente para formar un camino recto de cargas a lo largo de la altura del edificio hasta la cimentación, aunque se pueden crear aberturas de hasta 2,5 m de ancho.

El factor de control de estos módulos es la resistencia a la compresión de las paredes (que generalmente comprende muchos perfiles repetitivos de sección C de acero ligero con un espaciado de 300 a 600 mm a lo largo de la pared). Las cargas laterales dentro del módulo son resistidas mediante elementos de refuerzo y/o revestimiento.

Otro sistema estructural que es común para estas paredes es el panel sándwich de acero. La separación de estos perfiles o la resistencia de los paneles dependen de la cantidad de cargas de gravitatorias, la ubicación del módulo y la magnitud de la carga lateral. En la Figura 4.1 a) se muestra un módulo con paredes portantes.

La doble capa de la pared y la combinación suelo/techo puede mejorar el aislamiento acústico y la resistencia al fuego del sistema de constructivo.

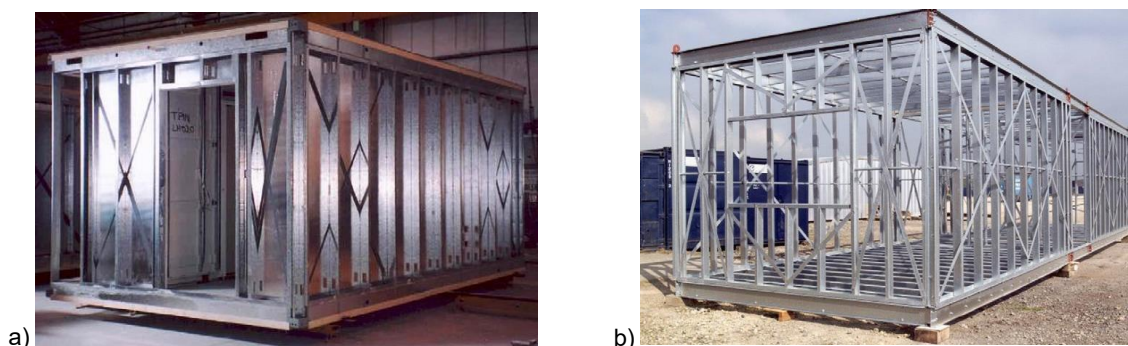


Figura 4.1 a) Módulos de paredes portantes. b) Módulos de esquinas portantes. Fuente: (Lawson and Ogden 2008).

Sistemas soportados en esquinas – módulos apilables

En este sistema, los módulos portantes usan secciones verticales intermedias y de esquinas para transmitir las cargas gravitatorias. Las columnas y vigas de canto en este sistema soportan cargas de gravitatorias, mientras que algunos elementos de refuerzo o revestimientos resisten las cargas laterales. Los perfiles de esquina deben alinearse y conectarse verticalmente a lo largo de la altura del edificio. Se pueden requerir secciones verticales intermedios adicionales en módulos largos.

El factor de control es la resistencia a la compresión de las columnas o secciones verticales de las esquinas y, por esta razón, las secciones huecas cuadradas de acero (SHS) se usan a menudo debido a su alta resistencia al pandeo. Un ejemplo de un módulo soportado en esquinas se muestra en la Figura 4.1 b).

Un aspecto crítico del rendimiento en dicho sistema sería la respuesta de carga lateral del edificio formado por módulos apilados. Dependiendo de la rigidez relativa de la viga del forjado y del techo y de sus conexiones a los pilares de esquinas, el comportamiento del poste en la conexión poste-poste puede ser diferente. En cualquier caso, dicho comportamiento también

dependerá del tipo de sistema resistente de carga lateral de todo el edificio. En la Figura 4.2 se ilustra un ejemplo de conexiones entre dos módulos 3D apilados apoyados en esquinas.

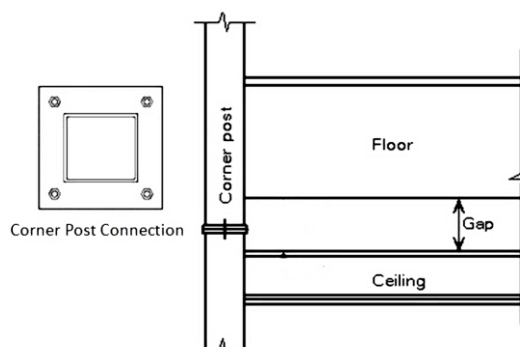


Figura 4.2 Ejemplo de conexión de 2 módulos 3D apilados Fuente: www.Steelconstruction.info

4.2. Sistemas estructurales panelizados

Sistema de paneles estructurales basado en la formación de una estructura mediante componentes prefabricados superficiales. Es decir, construcción a partir de elementos lineales y/o superficiales (paneles) que conforman el módulo esqueleto y el revestimiento principal del edificio (paneles de cerramiento exterior, divisiones interiores y forjado). El sistema de paneles es de menor grado de industrialización, ya que implican mayor número de tareas a realizar en obra. Esta segunda tipología es probablemente la más habitual. Los materiales son típicamente prefabricados de hormigón, madera, madera contralaminada o paneles aislados estructurales.

Este sistema simplifica el número de operaciones. Es una opción estructural clara en edificios donde su arquitectura permite que la envolvente tenga la suficiente solidez como para actuar como un elemento resistente, simplificando los requerimientos técnicos de la estructura.

Su colocación es diferente tanto en la fijación a la estructura del edificio como en los sistemas de juntas entre paneles. Dependiendo de si son homogéneos o multicapa, los paneles estarán constituidos por una o varias hojas.

En general, si el material base es hormigón armado, el panel se definirá como pesado, y si el material es GRC, metálico, vidrio u otro, entonces se definirá como ligero. Según el informe anual de MBI del año 2011, los sistemas panelizados 2D o ensamblajes tipo casete son ensamblajes completamente planos; paredes, cubiertas y suelos son los elementos candidatos para ser panelizados. Suelen fabricarse de madera, acero de poco espeso u hormigón. Algunos ejemplos:

- Paneles estructurales aislados (SIP, sus siglas en inglés) para sistemas de pared y techo.
- Paredes panelizadas de estructuras de madera o acero de poco espesor.
- Cimentación panelizada fina o paredes portantes de hormigón reforzado.

4.2.1. Sistemas panelizados en hormigón

El edificio se divide en un conjunto de piezas englobadas en distintas clases dependiendo de su naturaleza. Piezas destinadas para las paredes interiores, paredes exteriores, forjado, escaleras, etc. Normalmente estas piezas serán de hormigón, armado para paneles portantes y pretensados para las losas de forjados.

El ensamblaje a base de paneles de fachada actúa como elemento estructural, los cuales pueden estar formados por paneles portantes de dos capas de hormigón separadas por un aislante que hace las funciones térmicas y acústicas.

Luego, estas piezas quedarán unidas mediante elementos y forman juntas que hay que sellar a posteriori. En caso de los paneles portantes, las juntas se realizan soldando pletinas metálicas entre otras opciones.

Posteriormente por el lado interior del panel se realiza el paso de las instalaciones, se colocan los aislamientos y se realiza el trasdosado. La unión entre paneles se tiene que realizar con mortero fluido o siliconas especiales inalterables ante efectos ambientales.

La construcción se inicia con la cimentación, según el procedimiento tradicional. Para empezar con el panelizado (de hormigón armado o pretensado) hay que dejar una superficie de hormigón lisa u horizontal.

Las juntas horizontales se solucionan mediante anclajes metálicos soldados. Es conveniente que los paneles tengan el anclaje incorporado para luego en obra realizar la junta mediante la soldadura con el forjado o las placas dejadas en la estructura de transición.

Seguidamente se apuntala la zona donde con la ayuda de la grúa se colocan las losas de forjados. Posteriormente se echa el hormigón para generar una capa de compresión, normalmente de 5-10 cm, para monolitismo a las piezas colocadas y se continúa el proceso en el piso superior (Diego Gómez Muñoz 2008).

4.2.2. Sistema panelizado en acero

Paneles estructurales con alma metálica

Se trata de paneles estructurales, con alma de chapa metálica nervada o grecada, por tanto, portante. La aplicación de este sistema constructivo está pensada para edificios de hasta 4 alturas y con una conformación en planta rectangular. También pueden realizarse edificios de mayor altura combinando la estructura del panel con hormigón que ayude a soportar las cargas del edificio.

El espesor de los paneles irá marcado por la capacidad de aislamiento térmico y acústico que se requiera para los paneles interiores, junto con la impermeabilización para los paneles exteriores.

En otras capas se pueden colocar tableros OSB, placas de yeso laminado e incluso una malla trenzada de acero. Para conseguir suficiente rigidez se suelen colocar cruces de San Andrés en ambos lados del panel para evitar torsión.

Las uniones se realizan mediante tornillería y anclajes. Estos últimos sirven para unir el panel a la losa de cimentación.

La construcción de los forjados es la construcción de un techo de chapa colaborante. Este forjado se construye mediante la colocación de una chapa de acero nervada que sirve como encofrado para el hormigón armado que conforma la sección mixta del mismo. Los forjados puramente metálicos pueden desencadenar una flecha excesiva, por lo que se suele desestimar, aun siendo su colocación más rápida.

Uno de los inconvenientes que presenta este sistema es la colocación de las instalaciones. En el caso de tener que hacer huecos sin haberlos previsto con anterioridad se puede dañar la unión de las capas del panel (Diego Gómez Muñoz 2008).

Sistemas innovadores: Construmat 2019

Un sistema innovador presentado en el Construmat 2019 es el Baupanel® System. Un sistema constructivo integral, sismo resistente y aislante termoacústico basado en un conjunto de paneles estructurales. Extremadamente ligero, permite una facilidad de transporte e instalación. Según el fabricante, permite una reducción de tiempo en instalación de 50% en comparación con la construcción tradicional.

Se trata de un panel portante con alma de EPS cubierto por una malla de acero de refuerzo plana, revestimiento con hormigón proyectado, capa de compresión a ambos lados. La proyección del hormigón se realiza in-situ.

El panel Baupanel®, es un panel estructural portante y es utilizado tanto para las paredes de exterior como para la colocación de forjados y cubiertas.

Existen otros sistemas parecidos, pero en lugar de una malla de refuerzo se trata de un esqueleto de chapas grecadas de acero galvanizado combinado con morteros. Se trata del sistema de panel Evowall® portante, también presentado en el Construmat 2019. Las paredes son macizas, acabadas en yeso y sin juntas visibles. Las instalaciones de agua, luz, telecomunicaciones, etc. ya vienen integradas en los propios paneles. Las uniones son roscadas, propias del sistema. Este sistema es completamente industrializado, en la obra lo único que se realiza es la unión de los paneles verticales con las losas de hormigón armado de 25 cm, también prefabricado. Todos los elementos son transportados con un camión a la obra, donde mediante una grúa, los elementos son izados y montados.

La cimentación es común a todos los sistemas de panelizado. Lo más importante a la hora de empezar el montaje de los paneles es definir una base continua de un espesor adecuado e idénticas características para que se puedan anclar paneles por cualquier lado del plano.

4.3. Sistema estructural prefabricado

La prefabricación puede ser aplicada en muchos aspectos de la construcción. Los elementos estructurales de un edificio pueden ser prefabricados también como la fachada. Además, las instalaciones del edificio, electricidad, fontanería, HVAC pueden ser producidas y ensambladas en fábrica y estar listas para su instalación in-situ.

A pesar de la simplicidad de la construcción de viviendas unifamiliares modulares que provoca una construcción rápida in-situ, no se puede afirmar lo mismo para edificios modulares de varias plantas. Con el aumento en el número de plantas, el método de construcción y los problemas de ingeniería estructural se vuelven más complicados, en particular cuando las cargas laterales también deben ser consideradas. Por ello, en este capítulo, se introduce una nueva forma constructiva industrializada de sistema estructural, que se basa en el *Framing Structural System*, “esqueleto estructural” del edificio montado por componentes prefabricados. El sistema en general consiste en realizar el diseño, construcción y suministro a obra de todas las piezas industrializadas o prefabricadas necesarias para la construcción.

4.3.1. Sistema estructural en hormigón

Se trata de una construcción de hormigón armado aparentemente convencional, pero, donde el edificio se divide en un conjunto de piezas englobadas en distintas clases dependiendo de su naturaleza. Piezas destinadas para las vigas, columnas, forjado, escaleras, etc. Normalmente estas piezas serán de hormigón armado para los elementos estructurales

verticales y pretensados para las losas de forjados. Luego, estas piezas quedarán unidas mediante elementos y forman juntas que hay que sellar a posteriori. La cimentación sería la misma que para cualquier construcción tradicional.

Este sistema, es el único que permite construcciones de altura elevada con componentes exclusivamente prefabricados o una estructura de construcción convencional y un revestimiento de prefabricados de hormigón. También es posible encontrarse con otros tipos de elementos prefabricados integrados, como por ejemplo escaleras, mobiliario interior, etc.

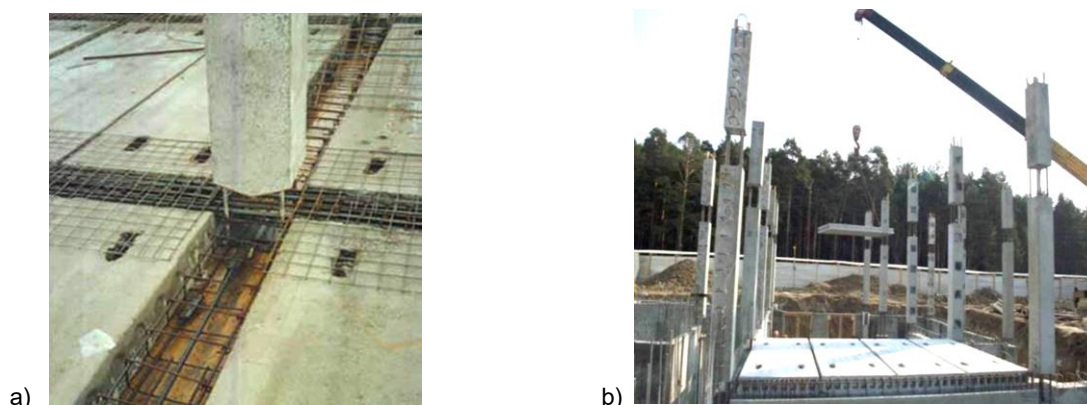


Figura 4.3 a) Unión de juntas de los elementos portantes de la estructura. b) Montaje de losas. Fuente: (Antonov, Molodtsov, and Molodtsova 2016)

Estructuras desmontables

El concepto de estructura desmontable ha ido tradicionalmente ligado a las estructuras metálicas. Tanto las uniones (principalmente atornilladas) como los elementos estructurales principales (perfiles laminados) se prestan a un proceso de reutilización. El concepto de construcción desmontable de hormigón trata de dotar a las construcciones tradicionales de hormigón de la flexibilidad y agilidad característica de las estructuras de acero. Además de su reintegración una vez cumplida su función.

El aspecto más importante de una construcción desmontable son las uniones. Los métodos constructivos que existen para estructuras desmontables giran en torno a las uniones. Una de las metodologías existentes consiste en independizar completamente los elementos verticales y horizontales. Los pilares tienen como terminación unas placas de acero base que encajan con el panel que representa el forjado superior y este a su vez con el pilar superior. Los tres elementos quedan solidarizados mediante tornillos. Una elevada presión en el apretado de los tornillos puede llevar a un comportamiento demasiado rígido de la estructura y a una rotura frágil. Por el contrario, una relajación de la tensión de apretado de la unión puede redundar en un mal comportamiento de la estructura. (Diego Gómez Muñoz 2008) y (Blanco Álvarez 2003).

4.3.2. Sistema estructural en acero

Sistema estructural de acero

La construcción de edificios mediante estructura metálica; tanto tradicional como de estructura ligera, consiste en un esqueleto de pilares y vigas de acero que definen el espacio del edificio y su configuración principal. Principalmente se utilizan perfiles de acero laminado S275 JR para estructuras estándar y clases de exposición comunes.

La cimentación en estos tipos de construcción se realiza en general mediante zapatas de hormigón armado in situ. Elementos sobre los cuales se colocan los perfiles metálicos mediante placas de anclaje conectadas a la armadura de la zapata estableciendo una unión empotrada. El proceso más común es dejar las esperas en la zapata de hormigón sobre las cuales se coloca el pilar con la placa de anclaje ya soldada en taller.

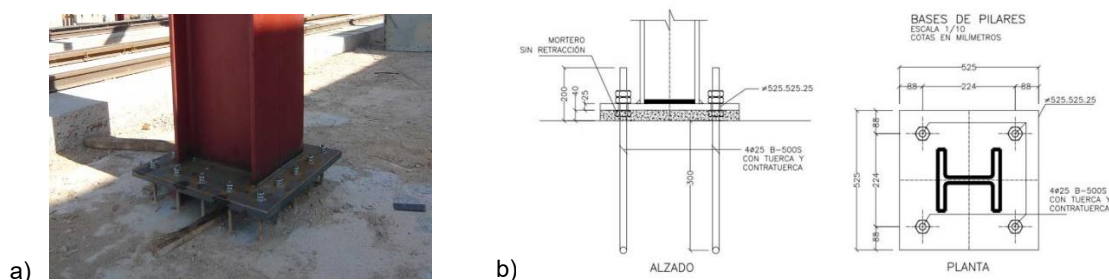


Figura 4.4 a) Fotografía placa de anclaje de pilares metálicos sobre hormigón. b) Ilustración técnica de placas de anclaje. Fuente: www.e-struc.com/

La estructura vertical se compone de pilares metálicos principalmente. En este caso, al tratarse de un conjunto de pilares, es necesario tener en cuenta la estabilidad global del edificio, por tanto, el estándar en estas construcciones es la de arriostrar mediante paneles de hormigón, diagonalizar la estructura o colocar cruces de san Andrés generando elementos rígidos que dan la estabilidad frente a esfuerzos horizontales al edificio. El perfil más utilizado para la estructura vertical es el HEB debido a su geometría cuadrada ofrece una inercia similar en ambas direcciones, a diferencia del resto de perfiles con una relación más alargada entre base y canto, ya que un pilar tiene esfuerzos de flector en ambos sentidos.

Para la estructura horizontal se plantea un entramado de vigas “cosiendo” todos los pilares. Estas vigas por lo general se unirán mediante articulación a los pilares excepto en los pórticos principales que irán arriostrados, como se comenta en el párrafo anterior, en cuyo caso la unión que se realizará será empotrada. El perfil más extendido para el entramado de vigas son los perfiles IPE ya que no deben soportar esfuerzos en horizontal y con una cantidad de acero más pequeña ofrece una gran capacidad en su eje principal ideal para los esfuerzos que sufre una viga.

Para los forjados, el método más común es el uso del forjado colaborante. Consiste en una chapa grecada de acero que se atornilla a la estructura principal de vigas y se hormigona. Este sistema permite una ejecución muy rápida comparada con sistemas tradicionales de hormigón puesto que la propia chapa grecada actúa de encofrado perdido y ofrece una inercia suficiente para no necesitar apuntalamiento permitiendo así un margen de maniobra en la obra mucho más amplio.

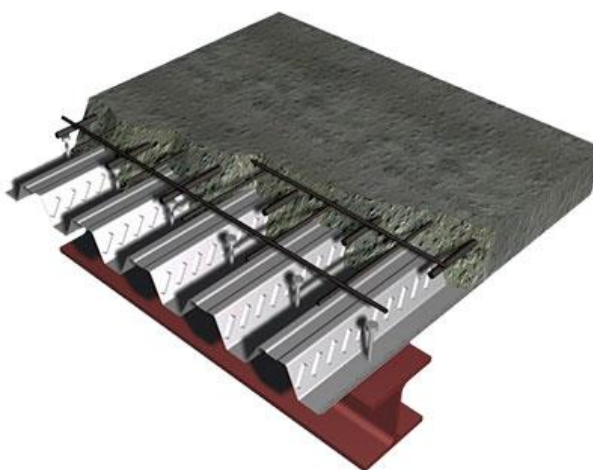


Figura 4.5 Forjado colaborante. Fuente: www.teczone.es

Las uniones en estructura metálica se dividen en dos tipos: uniones soldadas y uniones atornilladas. Las uniones soldadas presentan una gran capacidad de transmisión de esfuerzos en un espacio de intervención muy reducido mientras que las uniones atornilladas precisan de pletinas haciendo de la unión un elemento con más presencia.

Por lo general, se utilizan uniones soldadas en perfiles realizadas en taller mientras que en obra se opta por utilizar uniones atornilladas. Esto sucede porque en obra, al encontrarse a la intemperie en unas condiciones no controladas, no se puede garantizar con la fiabilidad del taller que la soldadura tenga las capacidades físicas que requiere. Por otra parte, las uniones atornilladas permiten un montaje rápido de cada pieza ya preparada en taller.



a)



b)

Figura 4.6 a) Unión soldada. b) Unión atornillada de elementos metálicos. Fuente: www.emquintana.com

Por último, el cerramiento se puede construir mediante cualquier tipo de panel prefabricado previendo las uniones del mismo con la estructura, los perfiles pueden venir preparados de taller para agilizar su montaje.

Las estructuras metálicas han de ser protegidas frente al fuego ofreciendo la resistencia que determine la normativa en función del tipo de edificio, etc. Se plantean distintas alternativas. Para poder dejarla vista, puede ser pintada con pintura intumescente calculando el espesor de ésta para la resistencia requerida. Otra alternativa es proyectar con vermiculita o similar generando una capa de protección. Por último, revestir la estructura con láminas de cartón-yeso RF u otros sistemas que ofrezcan la resistencia necesaria.

De esta manera se concluye que una estructura de acero ofrece grandes ventajas en cuanto a realización de obra reduciendo tiempos respecto a otros sistemas. Es un sistema muy versátil ya que admite todo tipo de geometrías y gracias a las características del acero se puede conseguir estructuras de secciones mucho más pequeñas que con otros sistemas como el hormigón.

Sistema estructural 2D

En general, en los sistemas 2D de acero, los forjados en forma de casetes están apoyados por paredes o una estructura (como se muestra en la *Figura 4.7*) que requiere la restricción de las uniones del forjado en estos sistemas. La función principal de las conexiones entre paneles 2D es la integración de éstas y la transferencia de carga entre ellos. Las conexiones deben tener una resistencia adecuada para transferir la carga gravitatoria y la lateral entre los paneles. Como se muestra en esta figura, estas conexiones consisten en sujetadores de pernos rígidos. Además, se considera el *shear key* en la parte superior de la columna, que va al casete y da lugar a movimientos uniformes de las juntas al nivel del forjado. Además, debido al uso de las *alas de la columna (wings)*, se logra una conexión rígida entre ésta y el casete.

La cimentación y la piel del edificio se llevaría a cabo de la misma forma que en el caso anterior (sistema estructura de acero).

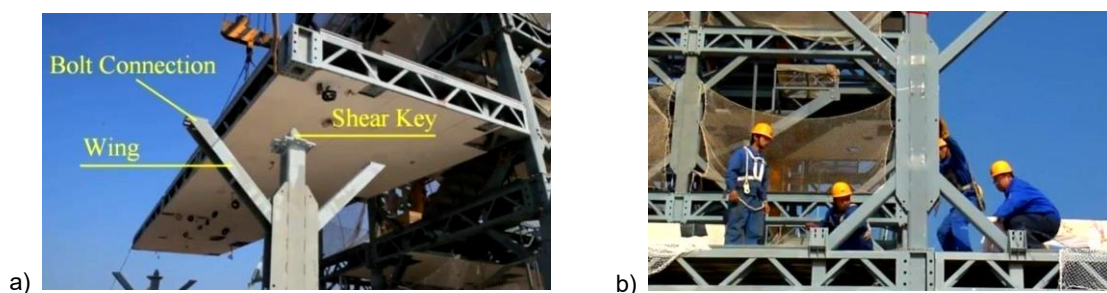


Figura 4.7 Montaje de sistema estructural panelizado de acero, conexión forjados casete – columna a) y b). Imagen del hotel Dongting Lake, Fuente: (Jackson, 2012).

4.3.3. Revestimiento de la estructura: fachada prefabricada

Vistos los diferentes tipos de construcción estructural por componentes de hormigón y de acero, toca ahora definir el revestimiento prefabricado que utilizan estos sistemas, más concretamente los paneles prefabricados de fachada. Existen múltiples formas de acabado de fachada: paneles hormigón aligerado, paneles de madera u otros materiales. Para la construcción de paneles tipo lámina se necesita un material que mantenga sus propiedades mecánicas independientes de las direcciones de los esfuerzos a los que estén sometidas (isotropía). El hormigón y el GRC son los materiales más adecuados para realizar elementos constructivos de este tipo. Por ello, en este capítulo se va a discutir un revestimiento de fachada general, que sirva para cualquier sistema estructural de *Framing*, mediante paneles GRC.

Paneles GRC

El GRC, que es el acrónimo en inglés de “*Glassfibre Reinforced Cement*” es un material compuesto, que surge hace treinta años como alternativa al hormigón armado, formado por una matriz de mortero de cemento armada con fibras de vidrio resistentes a los álcalis del mortero. En este material el hormigón resiste los esfuerzos de compresión y las fibras de vidrio distribuidas al azar, se encargan de absorber los esfuerzos de tracción. Aunque presente el inconveniente de contar con fibras en zonas donde el material trabaja únicamente a compresión y donde por tanto estas fibras no serían necesarias, presenta una reducción de costes en la mano de obra al resolverse el proceso de fabricación de una forma automatizada.

La matriz está formada por un mortero de cemento gris, por ejemplo, CEM I 52,5 R o blanco BL II 42,5 R, con resistencias de 52,5 y 42,5 N/mm² respectivamente, y arena de silicio con contenido de cuarzo (SiO₂) superior al 96 % del peso de la arena y con una granulometría de máximo 1,6 mm de diámetro (PlanasArk 2017). También puede estar constituido por un cemento ordinario tipo Portland. Cemento y arena se mezclan con la proporción indicada de agua y aditivos. Estos aditivos pueden ser: plastificantes, fluidificantes, superplastificantes, impermeabilizantes, hidrófugos, etc., dependiendo de las propiedades, diseño, fabricación u otros.

Las fibras de vidrio son álcalis resistentes y tienen forma de filamentos, con una resistencia a tracción de 2.500 MPa, un módulo de elasticidad de 70 GPa y un alargamiento en rotura del 3,6% (PlanasArk 2017).

Fabricación de paneles GRC

Existen dos aplicaciones básicas del GRC, que se diferencian por su sistema de fabricación;

- **Premezclado o “pre-mix”**, para pequeñas piezas o de formas complejas.

- **Proyección simultánea o “spray-up”** para piezas planas de mayor tamaño, principalmente paneles ligeros para fachadas.



Figura 4.8 Proceso de montaje de paneles GRC. Fuente: (PlanasArk 2017)

En general, las resistencias obtenidas por procesos de proyección son mayores que en premezcla, especialmente en el caso de proyecciones en las cuales las fibras se proyectan en dos direcciones.

También depende de la aplicación, según la cual las fibras de vidrio se pueden incorporar entre el 0,1% y el 5% en peso:

- Proporciones mínimas: las fibras minimizan la segregación de materiales, evitan microfisuración, aumentan la dureza y la resistencia a impacto.
- Proporciones entre 1% y 2%: las fibras ya arman el GRC.
- Proporciones entre 2% y 3,5%: para productos realizados por pre-mix.
- Proporciones del 5%: se utilizan para aplicaciones que exigen una gran resistencia, como por ejemplo en paneles autoportantes de fachada.

Anclaje y sujeción de paneles de GRC

En anclaje a la estructura de los paneles de fachada de GRC debe cumplir unos requisitos específicos para su correcta puesta en obra, evitando posibles lesiones de ejecución que se podría traducir en fisuras e incluso en el desgarramiento de los paneles. Estas condiciones son (Hernández Olivares et al. 2002):

- Deben de ir sujetos tanto en el extremo superior como en el interior.
- Deben de ir apoyados en su parte inferior, de tal modo que su centro de gravedad caiga sobre la zona de apoyo y poder así presentar una mayor resistencia a los efectos del viento.

- Las piezas auxiliares de sujeción deben diseñarse de forma que permitan el libre movimiento del panel debido a variaciones térmicas, siendo anclajes de tipo flexibles.
- La fijación se hará interponiendo arandelas elásticas, tipo neopreno, para no causar lesiones al panel.
- Por último, en el caso de los paneles tipo sándwich, las fijaciones se realizarán en zonas macizadas de un GRC de buena calidad.

Juntas entre paneles de fachada de GRC

Existen diferentes juntas entre paneles, las más utilizadas por su sencillez de ejecución son:

- **Junta sellada:** exige una separación entre paneles colindantes en función a la anchura mínima permitida por el mástique, donde el sellado es de pasta de silicona para proporcionar mayor durabilidad a la junta. En los paneles sándwich esta junta se complementa con un retén para evitar el desplazamiento del material de sellado al interior de la junta.
- **Junta abierta:** por su fabricación tan compleja no se usa con frecuencia, pero este tipo de junta permite una mayor separación entre dos paneles anexos.
- **Junta cerrada:** de gran empleo. Estas juntas precisan mantener una cierta compresión lateral entre los paneles para que funcione el sellado.
- **Perfil tapajuntas:** poco frecuente debido a la gran funcionalidad de las juntas anteriores. Permiten variaciones de anchura y movimiento de los paneles, pero deben estudiarse cuidadosamente los encuentros entre las juntas verticales y horizontales para no alterar la estética de la fachada.

5. Análisis comparativo de los sistemas

5.1. Finalidad del análisis comparativo

El objetivo de este capítulo es definir una serie de características relevantes en la construcción prefabricada. Una vez definidas las características a estudiar, proceder a una caracterización de las diferentes metodologías constructivas, que en este estudio se dividirán en tres, volumétricas, panelizadas y por componentes o estructural. Dicha caracterización no pretende ser cuantitativa ni tampoco absoluta, sino más bien cualitativa y general. Es decir, representar una definición simplificada, a groso modo, de la tecnología constructiva, ya que luego cualquiera de estas tecnologías puede ser adaptada y cumplir cualquier requisito y diseño constructivo. Por tanto, este breve análisis pretende realizar un rápido acercamiento de lector al mundo de la edificación industrializada, para dotar de unos ciertos conocimientos técnicos sobre este tema.

En este estudio se intentará dar con una comparación entre cada una de las técnicas constructivas vistas en el capítulo de sistemas de prefabricados. Para conseguirlo, se recopilará información comparativa respecto la construcción convencional u respecto otros sistemas de prefabricación constructiva. A lo largo de los siguientes apartados sí se harán referencias a los estudios para ayudar a elaborar una idea, una visión global del conjunto de los sistemas constructivos.

Por último, para definir las características se apoyará en dos pilares básicos: estructural (aspectos estructurales) y sostenibilidad (aspectos ambientales, económicos y sociales).

Una tabla final recogerá las características vs sistemas constructivos, indicando el nivel de la característica. Dicha tabla deberá ayudar al proyectista a escoger el sistema más conveniente para dependiendo de las necesidades y limitaciones del proyecto.

5.2. Definición de la metodología

Intentar dotar el estudio de unos datos absolutos resulta prácticamente imposible por las siguientes razones:

- Los resultados de unas determinadas características proporcionadas por algunos estudios también son cualitativos.

- Casi todos los estudios comparan o bien las características del aspecto económico o las características del aspecto ambiental, pero no ambas. Por tanto, es complicado hacer una adaptación fidedigna de los resultados obtenidos.
- Casi todos los análisis compraran un sistema constructivo industrializado en frente al tradicional. Son realmente poco los que ofrecen una comparación entre varios sistemas industrializados.
- Otra razón de peso es que se han encontrado algunos estudios que contradecían a unos otros, cosa que no es de extrañar, dado que cada uno de estos estudios fueron realizados en países tan distintos como, China, Reino Unido, Rusia y Malasia, dónde se da una diferencia entre el coste de la mano de obra, estado de las carreteras, industrialización, etc. Por tanto, es lógico pensar que los resultados obtenidos también sean distintos.

La metodología utilizada, para poder hacer una comparación lo más fiel posible pese a las numerosas diferencias, consiste en realizar la comparación estableciendo como unidad de medida la construcción convencional y expresar la diferencia de característica entre el sistema industrializado y el convencional en forma de ratio porcentual. Es decir, la división entre el sistema industrializado y sistema convencional expresado en porcentajes, donde el sistema de construcción convencional representa el 100%, que será la base de la medida de las características cuantitativas.

Por tanto, en caso de que se tenga que una característica cuantitativa A de un sistema industrializado cualquiera que representa, por ejemplo, el 90% respecto el convencional, esto significa que se produce una reducción del 10%, en los costes monetarios, tiempo de trabajo, etc. respecto lo que costaría la misma característica para el sistema convencional. Del mismo modo, si otra característica cuantitativa B que representa, por ejemplo, 110% respecto el convencional, significará que se haya producido un aumento de 10% para el sistema industrializado. Luego, en cada caso corresponderá analizar si esta reducción o aumento es de aspecto positivo o perjudicial para la tecnología constructiva.

Analizada la misma característica para cada uno de los sistemas industrializados en frente al sistema convencional, por último, quedará realizar una comparativa entre ellos mismos para definir el nivel correspondiente de cada uno entre los tres posibles (alto, medio y bajo) según la ratio obtenido.

A lo que se refiere a las características cualitativas, al no poder definir una ratio, se pasa directamente a la parte de comparación entre los sistemas expuestos mediante la flexibilidad, facilidad, rapidez y grado de industrialización que ofrezcan para cada característica.

Estudios

El primer artículo analizado es el “*Comparative Study on Prefabrication Construction with cast in-situ construction residential buildings*” elaborado por (Dineshkumar and Kathirvel 2015) donde se realiza un estudio comparativo entre un sistema de paneles estructurales prefabricados de hormigón en la construcción de un edificio residencial de dos plantas en India en frente a la construcción tradicional.

El siguiente estudio trata de un informe “*Using modern methods of construction to build homes more quickly and efficiently*” emitido por el (UK National Audit Office 2005). Éste, trata de sistema de paneles de hormigón, sistema de módulos volumétricos de hormigón y sistema híbrido (módulos volumétricos y paneles) prefabricados en la construcción de un edificio residencial de dos plantas en Reino Unido.

El artículo “*Framing Systems in Residential Construction*” de (Antonov et al. 2016) presenta el sistema de esqueleto estructural (*Framing Structure System*) por componentes prefabricados como alternativa al sistema de grandes paneles de hormigón. En construcción de un bloque residencial multi-planta en Rusia.

El estudio comparativo “*Comparative study of IPS and PPVC precast system - a case study of public housing building project in Singapore*” presentado por (Rahman and Rahman Sobuz 2018) analiza el Sistema de Paneles Individuales (IPS, sus siglas en inglés), pese al nombre, no se trata de un sistema de panelizado, sino de un sistema estructural por componentes prefabricados ya que como partes estructurales utiliza vigas, columnas, paredes y losas prefabricadas, y sistema modular volumétrico, conocido también como Construcción Volumétrica Prefabricada y Prefinalizada (PPVC, sus siglas en inglés) en construcción de un bloque residencial de 16 plantas en Singapur.

La tesis “*Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using the life cycle*”. de (Johnson 2006) realiza un análisis comparativo teórico del impacto ambiental de los sistemas de construcción mediante esqueleto estructural (*Framing Structural System*) de hormigón armado y de acero de un edificio de múltiples plantas. Este estudio mira desde el mismo principio de la obtención y transformación de la materia primera en elementos constructivos como vigas, columnas, etc.

El análisis elaborado en el artículo “*Embodied Energy Analysis of Prefabricated Reusable Building Modules For a Multi-Residential Building*” (Ngo et al. 2009) presenta el estudio de la energía consumida del sistema prefabricado de estructuras de acero (construcción modular prefabricada) en un edificio residencial de viviendas de ocho plantas en Australia.

La siguiente tesis “*A Comparative Evaluation of the Environmental Impact of Prefabrication versus Conventional Construction in UAE's Construction Industry.*” presentada por (Okodi-

lyah 2012) trata de un análisis comparativo de ciclo vida del sistema estructural por componentes prefabricados de hormigón frente a la metodología tradicional en la construcción de un edificio de gran altura (32 plantas) en los Emiratos Árabes Unidos.

Este otro estudio *“A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China.”*, llevado a cabo por (Cao et al. 2015), también compara el impacto ambiental entre un sistema estructural de componentes prefabricados de hormigón con muros al cortante frente al sistema tradicional en un edificio residencial de 9 plantas en China.

Esta tesina *“Estudio comparativo entre distintas metodologías de industrialización de la construcción de viviendas.”* de (Diego Gómez Muñoz 2008) realiza una amplia comparación de distintas características y sistemas constructivos. Aunque las características de impacto ambiental y social sean puramente cualitativas, la comparación económica sí es cuantitativa. Sistemas estudiados; sistemas modulares volumétricos de acero y hormigón, sistemas panelizados de acero y hormigón y estructuras ligeras de acero. Para la construcción de un hotel de 2 plantas en Cataluña.

El último estudio analizado *“La sostenibilidad en la construcción industrializada. La construcción modular ligera aplicada la vivienda”* trata de una tesis doctoral elaborada por (Wadel et al. 2009) que realiza una comparativa teórico del impacto ambiental entre sistemas de construcción modular industrializada. Módulos volumétricos de hormigón, acero y madera (que en este caso solo se considerarán los dos primeros) en frente a la construcción convencional en Cataluña.

5.3. Análisis

La construcción prefabricada se considera un enfoque de construcción sostenible debido a sus diferentes ventajas relacionadas con la reducción de costes, la eficiencia energética y la conservación del medio ambiente.

La sostenibilidad se puede lograr a través de tres aspectos principales que son: aspectos ambientales, aspectos económicos y aspectos sociales.

5.3.1. Aspectos económicos

Tiempo

Los resultados proporcionados en el estudio de (Dineshkumar and Kathirvel 2015) muestran que este sistema requiere únicamente el 51% del tiempo que haría falta para edificar la misma vivienda mediante un sistema de hormigonado convencional in-situ.

Tanto para el sistema panelizado como para el convencional los procesos y las ejecuciones de subestructura (limpieza del sitio, movimiento de tierra, cimentación, etc.) son las mismas y por consiguiente, también lo es el tiempo requerido.

El mayor ahorro de tiempo se da en el proceso de elevación de la estructura (el tiempo requerido representa el 23% del tiempo que se necesitaría el proceso convencional). Otro ahorro de tiempo, pero en menor medida, se da en los procesos de acabados e instalación de servicios, donde el tiempo requerido representa el 57% del tiempo que se necesitaría para el mismo proceso en una construcción convencional.

Paralelamente el informe (UK National Audit Office 2005) revela que el tiempo de construcción volumétrica representa un 40% del tiempo requerido por la construcción tradicional, de un sistema híbrido (volumétrico más paneles) un 75% y sistema panelizado también un 75% respecto el tiempo que requeriría la construcción convencional.

El estudio (Rahman and Rahman Sobuz 2018) que compara la utilización de módulos volumétricos frente al sistema estructural por componentes (FSS), muestra que la primera reduce el tiempo de construcción un 66% y la segunda un 50% respecto el sistema convencional.

La siguiente tabla, *Tabla 5.1*, elaborada en la tesina (Diego Gómez Muñoz 2008), se representa una comparativa del ratio porcentual de tiempo de construcción de diferentes tipos de construcción prefabricada frente a la construcción convencional. En ella se ve como los sistemas volumétricos de acero y de hormigón, con diferencia son los que más tiempo ahorran. Por el contrario, los sistemas de paneles estructurales de hormigón, los que representan un menor ahorro de tiempo.

	Volumétricos acero	Volumétricos hormigón	Paneles estructurales de hormigón	Paneles estructurales de acero	Estructura ligera de acero
Tiempo de construcción	14%	14%	79%	71%	64%

Tabla 5.1. Ratio porcentual de Tiempo de construcción de los sistemas prefabricados respecto el sistema convencional. Fuente: (Diego Gómez Muñoz 2008).

En resumen, teniendo en cuenta toda la información aportada y comentada en este subapartado del estudio del tiempo de construcción, se elabora la siguiente tabla representativa, *Tabla 5.2. Resumen de las ratios del Tiempo de construcción, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.*

TIEMPO (% respecto el convencional)	Volumétrico hormigón	Volumétrico acero	Paneles estructurales de hormigón	Paneles estructurales de acero	FSS de hormigón	FSS de acero
(Dineshkumar and Kathirvel 2015)	--	--	51%	--	--	--
(UK National Audit Office 2005)	40%	--	75%	--	--	--
(Rahman and Rahman Sobuz 2018)	34%	--	--	--	50%	--
(Diego Gómez Muñoz 2008)	14%	14%	79%	71%	--	64%

Tabla 5.2. Resumen de las ratios del Tiempo de construcción, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

Todos los estudios demuestran que la construcción modular volumétrica es la más rápida ya sea de estructura de hormigón como de acero. Por lo que parece, visto en los estudios (UK National Audit Office 2005) y (Diego Gómez Muñoz 2008), la construcción con paneles requiere más tiempo (siempre respecto lo que requeriría la construcción tradicional en las mismas circunstancias) que los FSS. Aunque si es cierto que la construcción con paneles de acero es algo más rápida que con los hormigones (estudio (Diego Gómez Muñoz 2008)) y en caso de FSS es al revés (estudio (Rahman and Rahman Sobuz 2018) y (Diego Gómez Muñoz 2008)).

Por consiguiente, la característica **“Ahorro de tiempo en la construcción”** será:

- Volumétrico > FSS > Paneles

Coste

El uso de la construcción prefabricada con sus diferentes niveles de prefabricación ofrece grandes oportunidades para reducir el coste directo e indirecto del proceso de construcción del proyecto.

El coste directo es el coste que se atribuye completamente al proceso de producción y construcción. Los factores que afectan el coste directo incluyen el coste mecánico, el coste del material, el coste de transporte, el coste de mano de obra y el coste de las grúas.

Shan Zhang y otros han investigado los costes directos del sistema prefabricado a través de un estudio comparativo con la tecnología de construcción tradicional para determinar el potencial del sistema prefabricado para reducir el coste. El estudio se basó en el cálculo del coste directo requerido para el panel de muro de hormigón prefabricado como un caso de

estudio y comparándolo con el coste directo requerido para el muro de ladrillo tradicional. El estudio demostró que el sistema prefabricado tiene costes mecánicos y de materiales más altos (124,3% más costes mecánicos y 134,6% más costes de materiales), mientras que tiene un coste laboral más bajo (86,5% más costes laborales). El coste directo general del panel de muro de hormigón prefabricado no es mucho más alto (105,5%) que el muro de ladrillo tradicional (Zhang et al. 2014).

Según el artículo (Dineshkumar and Kathirvel 2015) el coste que representa un sistema panelizado respecto el convencional es de 121%, es decir un 21% más caro. El análisis del coste está dividido en 3 procesos; subestructura, tal como se puede ver representado en la siguiente Tabla 5.3 Ratios porcentual comparativo de los Costes de Prefabricación de cada etapa respecto el convencional y el peso de cada etapa respecto el total. Fuente: (Dineshkumar and Kathirvel 2015).

	Sistema Panelizado hormigón		Convencional	
	Respecto Convencional	Respecto Coste Total propio	Respecto Convencional	Respecto Coste Total propio
Cimentación	100%	7%	100%	9%
Estructura	237%	33%	100%	17%
Acabados e instalaciones	97%	60%	100%	74%
Total	121%	100%	100%	100%

Tabla 5.3 Ratios porcentual comparativo de los Costes de Prefabricación de cada etapa respecto el convencional y el peso de cada etapa respecto el total. Fuente: (Dineshkumar and Kathirvel 2015).

Mientras que la comparación realizada en (UK National Audit Office 2005) muestra que el volumétrico representa un 140%, el híbrido (volumétrico más panelizado) un 115% y el panelizado un 100% del coste del sistema convencional, es decir, cuesta lo mismo.

Por otro lado, el estudio (Antonov et al. 2016) para una vivienda de múltiples plantas muestra que el sistema de estructuras por componentes es un 83,6% y el sistema panelizado un 108,8% del coste del sistema convencional. Además, este mismo estudio muestra que si se considera únicamente la elevación de la estructura prefabricada de hormigón, ésta representa un 45,7% de las estructuras de acero.

En (Rahman and Rahman Sobuz 2018) el uso de IPS (framing prefabricado) reduce los costes totales en 20% respecto al convencional. Mientras con el sistema PPVC (volumétrico) la reducción puede llegar hasta el 40%.

En la siguiente tabla, Tabla 5.4, de elaboración propia a partir de la información obtenida de la tesina (Diego Gómez Muñoz 2008), se representa el ratio comparativo de los Costes Totales de cada tipología de sistema constructivo prefabricados, y como siempre, respecto al

sistema convencional.

Proceso	% Respecto a:	Convencional	Volum. acero	Volum. hormigón	Paneles hormigón	Paneles acero	Estructura ligera acero
Movimiento de tierras + cimentación	Convencional	100%	100%	100%	100%	88%	76%
	Costes Totales propios	8%	6%	5%	7%	6%	5%
Estructura + Cerramientos	Convencional	100%	271%	327%	118%	131%	147%
	Costes Totales propios	36%	76%	80%	42%	46%	49%
Instalaciones	Convencional	100%	50%	50%	95%	90%	90%
	Costes Totales propios	15%	6%	5%	14%	13%	13%
Resto de partidas	Convencional	100%	46%	46%	100%	100%	100%
	Costes Totales propios	30%	11%	9%	29%	28%	27%
Mano de obra	Convencional	100%	13%	13%	70%	63%	57%
	Costes Totales propios	11%	1%	1%	7%	7%	6%
Costes Totales	Convencional	100%	129%	149%	102%	105%	109%
	Costes Totales propios	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 5.4. Ratio comparativa de los Costes Totales de cada tipología de sistema respecto los Costes Totales en construcción convencional. Fuente: (Diego Gómez Muñoz 2008) y elaboración propia.

Los gastos de los cerramientos interiores y exteriores para los modulares volumétricos son, evidentemente, nulos. En todas las variantes de sistemas, el proceso de elevación de la estructura es la de mayor coste. Pero, en los sistemas de paneles (tanto de hormigón como acero) y estructura ligera de acero galvanizado, esta diferencia es mucho menor que en los casos de sistemas volumétricos.

En resumen, teniendo en cuenta toda la información aportada y comentada en este subapartado del estudio del coste de construcción, se elabora la siguiente tabla representativa, Tabla 5.5 Resumen de las ratios de Coste Total de construcción, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

También en el estudio (Antonov et al. 2016), los costes de FSS de hormigón respecto acero representan un 45,7%, únicamente en la elevación de la estructura, por tanto, se puede decir que el coste FSS de acero es superior al de hormigón. Se aprecia que en general la construcción volumétrica es la más cara (excepto en el caso del estudio (Rahman and Rahman Sobuz 2018)), seguida de los sistemas con paneles (donde parece hay bastante

consenso entre los estudios).

COSTE (% respecto el convencional)	Volumétricos hormigón	Volumétricos acero	Paneles hormigón	Paneles acero	FSS hormigón	FSS acero
(Dineshkumar and Kathirvel 2015)	--	--	121%	--	--	--
(UK National Audit Office 2005)	140%	--	100%	--	--	--
(Antonov et al. 2016)	--	--	109%	--	84%	--
(Rahman and Rahman Sobuz 2018)	60%	--	--	--	80%	--
(Diego Gómez Muñoz 2008)	149%	129%	102%	105%	--	109%

Tabla 5.5 Resumen de las ratios de Coste Total de construcción, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, la característica **“Ahorro de costes generales de construcción”** presenta:

- FSS de hormigón > FSS de acero = Paneles > Volumétrico

Parece ser que los beneficios respecto los costes de un sistema de prefabricados son debidos más a su capacidad de control, previsión y reducción de gastos que por el gasto en sí mismo.

Es importante recalcar que la modularización no es apropiada ni rentable económicamente para cualquier proyecto, factor íntimamente ligado con la escala del proyecto. Grandes estructuras, con muchas unidades repetidas, son las que pueden ser modularizadas eficientemente.

Por otro lado, el enfoque de la arquitectura prefabricada puede afectar positivamente el coste del proyecto a través de:

- Reducción del tiempo de construcción y, por consiguiente, inversión más rápida
- Aumentar la productividad de las obras del sitio.
- Reducir los residuos del sitio.
- Reducir la supervisión del sitio.
- Eliminar cambios durante la construcción y reducir el trabajo.

Trabajo

Según el mismo estudio comparativo (UK National Audit Office 2005) el trabajo y, por consiguiente, la mano de obra en el sitio representa un 25% para el volumétrico, un 75% para el híbrido y un 80% para el sistema panelizado respecto la fuerza de trabajo necesaria para el sistema convencional.

Mientras que (Rahman and Rahman Sobuz 2018) muestra que un sistema volumétrico ahorra un 40%, mientras que el sistema de FSS tan solo un 10%, a nivel de proyecto estructural respecto el convencional. Además, a nivel de mano de obra constructiva, PPVC ahorra un 70% del trabajo y el IPS un 30% respecto el sistema convencional.

Si se hace una relación directamente proporcional entre el coste de la mano de obra y la cantidad de trabajo entonces, la tesina (Diego Gómez Muñoz 2008) indica:

% respecto el convencional	Volumétricos acero	Volumétricos hormigón	Paneles hormigón	Paneles acero	Estructura ligera acero
Tiempo de construcción	14%	14%	79%	71%	64%
Coste de mano de obra	13%	13%	70%	63%	57%

Tabla 5.6. Ratios comparativas de los Costes de mano de obra y el Tiempo de construcción de cada tipología de sistema respecto el sistema convencional. Fuente: (Diego Gómez Muñoz 2008).

En resumen, teniendo en cuenta toda la información aportada y comentada en este subapartado del estudio del trabajo de construcción, se elabora la siguiente tabla representativa, Tabla 5.7 Resumen de las ratios de fuerza de Trabajo de construcción requerida, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

TRABAJO (% respecto el convencional)	Volumétricos hormigón	Volumétricos acero	Paneles hormigón	Paneles acero	FSS hormigón	FSS acero
(UK National Audit Office 2005)	25%	--	80%	--	--	--
(Rahman and Rahman Sobuz 2018)	30%	--	--	--	70%	--
(Diego Gómez Muñoz 2008)	13%	13%	70%	63%	--	57%

Tabla 5.7 Resumen de las ratios de fuerza de Trabajo de construcción requerida, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

Vuelve haber consenso en que el sistema volumétrico es el más rápido, tanto para acero como hormigón. Pero, a lo que se refiere a estructuras de paneles y FSS, la diferencia no la marca el sistema sino el material. Por tanto, se puede apreciar que en ambos casos la construcción con paneles de acero y FSS de acero requiere menos trabajo que los de

hormigón.

Por consiguiente, la característica **“Ahorro de mano de obra”** será:

- Volumétrico > Paneles de acero = FSS de acero > Paneles de hormigón = FSS de hormigón

Beneficios económicos

En el mismo informe (UK National Audit Office 2005) la comparativa muestra que los sistemas volumétricos aportan un beneficio de 85 libras/m² frente a las 32 libras/m² del panelizado. Esto demuestra que el beneficio que se puede obtener de un edificio es mayor cuanto antes se ponga en explotación. Por tanto, menor tiempo constructivo implica mayores beneficios (a pesar de que el sistema sea más caro). Pero, además, se ha de tener en cuenta lo siguiente, la construcción por componentes va enfocada a edificios de muchas plantas (ya sea residencial u oficinas) con más ocupantes, por tanto, hará que el beneficio suba.

Los edificios altos (construcciones FSS) favorecen a los métodos de construcción modernos, dado que el coste de los bloques y ladrillos sube más rápido (UK National Audit Office 2005) que los elementos prefabricados off-site. Una construcción más rápida y trabajo reducido in-situ proporciona beneficios económicos.

Los costes in-situ serán menores para los volumétricos y mayores en la fabricación off-site y al revés para el panelizado.

Por consiguiente, la característica **“Beneficios económicos”** queda:

- Volumétricos > FSS > Paneles

5.3.2. Aspectos ambientales

Energía consumida

De acuerdo al estudio de (Wadel et al. 2009), representado en la Tabla 5.8 Ratios porcentuales comparativas de la Energía Consumida de cada etapa del proceso respecto, el modular acero representa el 116% del convencional y el modular de hormigón un 104% del convencional. La diferencia de consumo entre estos casos es de 12%, esto crea una leve discordancia con el estudio (Johnson 2006) donde se afirma que el consumo es el mismo. Pero, sí que concuerda que la fase de producción es donde más energía se consume con diferencia, seguida de transporte y construcción.

Es interesante mencionar que según (Wadel et al. 2009) el consumo en el transporte y construcción con modulares de hormigón son levemente superiores al de acero. En cambio, para la extracción y fabricación del material es notablemente inferior (un 13%).

Etapas del proceso	%Respecto a:	Convencional	Volumétrico hormigón	Volumétrico acero
Extracción y fabricación de materiales	Convencional	100%	111%	124%
	Energía Total Propia	90,7%	97,0%	97,5%
Transporte	Convencional	100%	88%	80%
	Energía Total Propia	3,2%	2,7%	2,2%
Construcción	Convencional	100%	6%	5%
	Energía Total Propia	6,1%	0,4%	0,3%
Total	Convencional	100%	104%	116%
	Energía Total Propia	100%	100%	100%

Tabla 5.8 Ratios porcentuales comparativas de la Energía Consumida de cada etapa respecto el convencional y el peso de cada etapa respecto el total. Fuente: (Wadel et al. 2009).

Mientras que el estudio (Ngo et al. 2009) dice que la energía consumida por los prefabricados de acero de módulos reutilizable en edificio plurifamiliar representa el 150% del sistema de hormigonado convencional.

Por otro lado, en el estudio (Johnson 2006), representado en la Tabla 5.9, la energía consumida de estructuras de acero es la misma que en estructuras de hormigón, donde se definen 3 procesos; construcción, transporte y producción del material, este último representa en ambos casos aproximadamente el 70% de la energía consumida.

Etapas del proceso	Acero	Hormigón
Producción del Material	70%	69%
Transporte	19%	18%
Construcción	11%	13%
Energía Consumida Total	100%	100%

Tabla 5.9 Peso de la Energía Consumida en cada etapa del proceso constructivo del sistema convencional en acero y en hormigón. Fuente: (Johnson 2006).

Además, del mismo estudio, se puede sacar la siguiente información, plasmada en la Tabla 5.10 Comparativa de los valores normalizados de impacto ambiental del proceso constructivo del sistema convencional en acero y en hormigón. Fuente: (Johnson 2006). En dicha tabla, se puede observar claramente como el acero supone una menor emisión de CO₂ y un menor

consumo de recursos, mientras que el consumo de energía se mantiene igual al hormigón.

Emisiones CO ₂		Consumo de Energía		Consumo de recursos	
Acero	Hormigón	Acero	Hormigón	Acero	Hormigón
75,6%	100%	100%	100%	30,5%	100%

Tabla 5.10 Comparativa de los valores normalizados de impacto ambiental del proceso constructivo del sistema convencional en acero y en hormigón. Fuente: (Johnson 2006).

En el estudio (Cao et al. 2015) la prefabricación consume el 82% del convencional. En resumen, teniendo en cuenta toda la información aportada y comentada en este subapartado del estudio de la energía consumida en las fases de la construcción, se elabora la siguiente tabla representativa, Tabla 5.11 Resumen de las ratios de Energía Consumida, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

ENERGIA (% respecto el convencional)	Volumétricos hormigón	Volumétricos acero	Paneles hormigón	Paneles acero	FSS hormigón	FSS acero
(Cao et al. 2015)	--	--	--	--	82%	--
(Ngo et al. 2009)	--	150%	--	--	--	--
(Wadel et al. 2009)	104%	116%	--	--	--	--
(Diego Gómez Muñoz 2008)	> 100%	> 100%	> 100%	> 100%	--	< 100%

Tabla 5.11 Resumen de las ratios de Energía Consumida, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, la característica de **“Ahorro de consumo energético”** queda:

- FSS > Paneles = Volumétrico de hormigón > Volumétrico de acero.

Emisiones CO₂

A continuación, en la Tabla 5.12 obtenida del estudio (Wadel et al. 2009), se representa el desglose de las emisiones de CO₂ de acuerdo según las etapas del proceso global de construcción con los sistemas volumétricos de hormigón y acero. Lo primero que se puede observar en dicha tabla, es como en ambos casos, volumétrico de hormigón y volumétrico de acero, las emisiones de CO₂ en la etapa de construcción son ínfimas. Es decir, del 100% de las emisiones que representan todo el proceso global de extracción, transporte y construcción tan sólo el 0,3% y 0,2% (sistemas volumétricos de hormigón y acero, respectivamente) de las emisiones de CO₂ son debidas a la etapa constructiva.

Etapas del proceso	%Respecto a:	Convencional	Volumétrico hormigón	Volumétrico acero
Extracción y fabricación de materiales	Convencional	100%	102%	118%
	CO ₂ Total Propio	91,2%	97,6%	98,1%
Transporte	Convencional	100%	88%	80%
	CO ₂ Total Propio	2,3%	2,1%	1,7%
Construcción	Convencional	100%	4%	3%
	CO ₂ Total Propio	6,5%	0,3%	0,2%
Total	Convencional	100%	96%	110%
	CO ₂ Total Propio	100%	100%	100%

Tabla 5.12 Ratios porcentuales comparativas de las Emisiones de CO₂ de cada etapa respecto el convencional y el peso de cada etapa respecto el total. Fuente: (Wadel et al. 2009).

Por otro lado, el cómputo global de las emisiones es: el modular acero representa el 110% del convencional mientras que el modular hormigón representa el 96% del convencional. Aquí se presenta una discrepancia con el estudio (Johnson 2006) donde se dice que las emisiones de CO₂ en construcción de edificios de hormigón representan un 32% más que el acero. De igual modo que con la energía consumida. Aquí la mayor parte de las emisiones se da en la extracción y fabricación de los materiales.

Además, hay que tener muy en cuenta que el acero es un material altamente reciclado, es decir, en la producción de perfiles de acero la proporción del reciclado es elevada. Actualmente el promedio de contenido reciclado es de 96% (USA Steel Recycling Institute, 2005). En la Tabla 5.13 se observa que el contenido del reciclado no es significativo en las emisiones de CO₂, ya que reduciendo un 25% de proporción de reciclado las emisiones de CO₂ solo se reducen un 2,5%. Por tanto en el estudio (Johnson 2006) se muestra que las emisiones de CO₂ por contenido de acero reciclado en la producción de vigas es la siguiente:

Contenido de reciclado	Emisiones de CO₂	% de cambio
95%	1,242 kg/SF	--
75%	1,273 kg/SF	+2,5%
50%	1,311 kg/SF	+3%

Nota:

SF: Square Foot (pie cuadrado). 1 SF = 0,0929 m²

Tabla 5.13 Variación de las Emisiones de CO₂ en función del contenido de acero reciclado en la producción de vigas. Fuente: (Johnson 2006).

Continuando con el estudio (Johnson 2006), los principales contribuyentes a las emisiones de CO₂ para los edificios con estructura de acero son la producción de vigas de acero al 52% y

la producción de hormigón (para losas) al 32%. Estos dos sistemas principales de productos representan casi el 85% del total de las emisiones de CO₂, tal como se puede observar en la Tabla 5.14, donde se muestran las emisiones en funciones de las etapas del proceso y del material. Este es un resultado obvio porque las vigas de acero y las losas del forjado de hormigón representan la gran mayoría del material utilizado en la construcción de estructuras de acero.

Etapas del proceso	Acero	Hormigón
Producción del Material	83%	87%
Transporte	11%	8%
Construcción	6%	6%
Emisión de CO ₂ Total	100%	100%

Tabla 5.14 Peso de las Emisiones de CO₂ en cada etapa del proceso constructivo del sistema convencional en acero y en hormigón. Fuente: (Johnson 2006).

En el estudio (Okodi-lyah 2012) el prefabricado presenta un 55,8% del convencional teniendo en cuenta los procesos de manufactura, transporte y construcción.

En algunos casos queda patente que la construcción con acero genera más CO₂ que la de hormigón y en algunos otros es al revés. Visto en las tablas presentadas por el estudio (Johnson 2006) la construcción es la etapa que menos CO₂ genera, así pues la diferencia no residirá en la forma constructiva sino en la diferencia de extracción y fabricación de los materiales. Dado que, según el estudio (Antonov et al. 2016), los sistemas FSS consumen un 43% menos de acero y un 55% menos de hormigón (principales generadores de CO₂) en comparación con los sistemas constructivos basados en grandes paneles.

Por tanto, la característica **“Reducción en las emisiones de CO₂”** queda:

- Volumétrico hormigón > Volumétrico acero = FSS > Paneles

Agua

El consumo de agua pertenecida al proceso de extracción y fabricación en el estudio (Wadel et al. 2009) representa para el modular volumétrico de hormigón un 103% y para el volumétrico de acero un 94% del sistema convencional.

Mientras que el (Cao et al. 2015) dice que los prefabricados de hormigón consumen un 78% del convencional. Hay que anotar que este estudio hace referencia a una construcción de FSS con grandes paneles prefabricados al cortante.

Para el estudio (Okodi-lyah 2012) el consumo en prefabricación por componentes representa un 96% del convencional.

Para (Johnson 2006) la construcción convencional de acero respecto el hormigón, la reducción en consumo de agua es de 32%.

Lo que se saca en claro a partir de los estudio (Wadel et al. 2009) y (Johnson 2006) es que la construcción de acero consume menos agua que la de hormigón. En cierta forma la tesina (Diego Gómez Muñoz 2008) corrobora esta deducción, no obstante, este estudio no está basado en datos exhaustivos como lo son los anteriores.

En resumen, teniendo en cuenta toda la información aportada y comentada en este subapartado del estudio del consumo de agua, se elabora la siguiente tabla representativa, Tabla 5.15 Resumen de las ratios de Consumo de Agua, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

AGUA (% respecto el convencional)	Volumétricos hormigón	Volumétricos acero	Paneles hormigón	Paneles acero	FSS hormigón	FSS acero
(Okodi-lyah 2012)	--	--	--	--	96%	--
(Cao et al. 2015)	--	--	--	--	78%	--
(Wadel et al. 2009)	103%	94%	--	--		--
(Diego Gómez Muñoz 2008)	< 100%	<< 100%	< 100%	<< 100%	--	<< 100%

Tabla 5.15 Resumen de las ratios de Consumo de Agua, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, la característica **“Ahorro consumo de agua”** es la siguiente:

- Paneles acero = FSS acero= Volumétrico acero > Paneles hormigón = FSS hormigón > Volumétrico hormigón.

Consumo de materiales y Residuos

Según (Antonov et al. 2016) el consumo de materiales en los sistemas FSS (framing structural systems) es significativamente inferior a la construcción con sistemas de panelizado. En FSS se consume aproximadamente el 43% de acero y el 55% del hormigón del que representa el consumo de sistema de paneles. Pero en cambio el consumo de la madera estructural es 33% mayor y el consumo del ladrillo representa el 320% (este se usa para los cerramientos, tabiques y/o fachadas, cosa que se podría reducir enormemente si se usaran paneles de GRC como cerramiento).

En general la construcción de acero convencional (elementos portantes de acero) presenta una reducción en el consumo de materiales de hasta el 68% (Johnson 2006).

Según el estudio (Cao et al. 2015) el consumo de recursos en un sistema de ensamblaje

estructural con paneles prefabricados es de 64% respecto el convencional (donde el mayor ahorro se da en la madera). Los residuos sólidos representan el 99% respecto el convencional.

Por otro lado (Ngo et al. 2009) dice que los módulos de acero estructural prefabricado representan el 22% del consumo de materiales del convencional con un 51% reutilizables.

Según el (Wadel et al. 2009) el consumo de recursos en la extracción y fabricación de materiales para módulos volumétricos de acero representa unos 395,33 kg/m² de los cuales un 10% es reciclado y otro 10% reciclable. Mientras que para volumétricos de hormigón son 891,82 kg/m² de los cuales un 16,7% es reciclado y un 15,5% reciclable. En comparación con el convencional donde 1420,26 kg/m² de recursos son consumidos con un 21,4% tanto en reciclado como reciclable.

Por lo tanto, en (Wadel et al. 2009), el volumétrico de acero representa un consumo del 28% del convencional y el volumétrico de hormigón el 63%, debido a la gran cantidad de hormigón que se utiliza, del convencional.

Mientras que según el estudio (Okodi-lyah 2012) donde se compara la construcción prefabricada por componentes de hormigón respecto el convencional se distingue que el consumo de materiales sólidos es del 21% respecto el convencional. Donde el principal consumo se lleva el forjado (68% del total).

Según el estudio (Rahman and Rahman Sobuz 2018), utilizando el sistema de módulos de hormigón volumétricos se llega a reducir hasta un 95% el uso del hormigón húmedo (in-situ). Mientras que para los sistemas de paneles individuales hasta un 90%.

En resumen, teniendo en cuenta toda la información aportada y comentada en este subapartado del estudio del consumo de materias primas y materiales, se elabora la siguiente tabla representativa, Tabla 5.16 Resumen de las ratios de Consumo de Materiales sólidos, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

CONSUMO MATERIALES (% respecto el convencional)	Volumétricos hormigón	Volumétricos acero	Paneles hormigón	Paneles acero	FSS hormigón	FSS acero
(Ngo et al. 2009)	--	22%	--	--	--	--
(Okodi-lyah 2012)					21%	
(Cao et al. 2015)	--	--	--	--	64%	--
(Wadel et al. 2009)	63%	28%	--	--		--

Tabla 5.16 Resumen de las ratios de Consumo de Materiales sólidos, según estudios analizados en función de los sistemas prefabricados, respecto el convencional. Fuente: Elaboración propia.

Queda claro pues, que un sistema volumétrico por simple hecho de serlo no implica menor consumo del cómputo total de materiales respecto los otros sistemas. Pero queda evidente que los sistemas basados en acero aligeran la densidad superficial de la construcción, por tanto, se reduce el consumo en kg de materiales (se deja de utilizar tanto ladrillo y hormigón).

Por tanto, la característica **“Ahorro consumo de materiales”** queda:

- Volumétrico acero = FSS acero > FSS hormigón = Paneles acero > Paneles hormigón = Volumétrico hormigón

Y, a lo que se refiere a los residuos de obra, utilizando el sistema IPS la reducción fue en un 70% respecto el convencional (Rahman and Rahman Sobuz 2018).

Mientras que (Lawson et al. 2012) afirma que, para los sistemas volumétricos en acero, la existencia de escombros es mínima y la mayor parte de la ejecución es en seco, resultando, de este modo, un menor impacto ambiental. Se produce una reducción sustancial en los residuos de construcción, los cuales representaban entre el 10 y el 15% en la construcción tradicional, a menos del 5 % en peso de residuos de construcción en un entorno controlado de fábrica. Lo que ofrece, a su vez, mayores oportunidades de reciclaje, el 43% de los residuos de manufactura de los módulos son reciclados.

Y la característica de **“Reducción de residuos en la obra”**, queda:

- Volumétricos = Paneles > FSS.

5.3.3. Aspectos sociales

Ruido y polvo

La generación de ruido y polvo en modular volumétrica es mínima tanto en exposición como en severidad (presenta más problemas la ocupación de la vía por los tamaños de los módulos).

En panelados prefabricados, gran parte de las operaciones en obra se basan en las uniones, juntas y acabados, tienen como principal molestia el ruido del ensamblaje y uniones de los elementos. En caso de los sistemas prefabricados por componentes, al haber más uniones, mayor es el tiempo de exposición. Cuanta mayor industrialización, menor ruido y polvo.

Por consiguiente, la característica **“Reducción de ruido y polvo”** queda:

- Volumétricos > Paneles > FSS.

Ocupación de la vía

En la tesina (Diego Gómez Muñoz 2008), molestias a usuarios en la construcción modular acero y hormigón viene dada por la ocupación de la vía en el transcurso del izado de los módulos con la grúa (o cuando llega el camión). Ya que en este tipo de construcción la mayoría de las operaciones son realizadas en fábrica. Por lo que la ocupación de la vía se da durante un tiempo bastante limitado, pero a su vez la problemática generada es elevada, ya que los módulos ocupan mucho espacio al tener que ser almacenados por los alrededores mientras la grúa los apila. Hay que puntualizar, si bien es cierto que la construcción mediante elementos 3D es más rápida, mientras dura la edificación son requeridos una o más grúas. El caso crítico se sitúa en el sistema de paneles con hormigón armado, que requiere la presencia y acción continua de una o más grúas (UK National Audit Office 2005)

En la construcción ligera, al pesar y ocupar los elementos mucho menos, la ocupación de la vía es mucho menor. Para los paneles prefabricados, la ocupación de la vía es algo más prolongada que la construcción modular, pero de misma severidad (más pesados, más lentos), aunque algo mayor para la construcción ligera (menos pesados, más rápido).

Según (UK National Audit Office 2005) el uso de los andamios para el volumétrico es el 55% del tiempo que requeriría uno de construcción convencional (de ladrillo y bloques de hormigón). Mientras que los sistemas de paneles e híbridos representan un 73% del convencional. Lo que se corrobora con el sistema de IPS (Rahman and Rahman Sobuz 2018) llega a ahorrar de 75 a 90% el uso de los andamios en la obra.

Por consiguiente, la característica ***“Reducción ocupación de la vía”*** queda:

- FSS > Volumétricos > Paneles.

Seguridad y salud

Un aspecto que cada vez adquiere mayor importancia es la seguridad laboral. El mayor riesgo existente es el izado de grandes cargas por parte de grúas, a parte también del trabajo de altura. En estructuras metálicas, por su parte, se tienen que evitar cortes con metales, contactos eléctricos y demás.

Los módulos en hormigón, aun que representen una carga pesada, al tratarse de un montaje de baja altura con escasa intervención del operario, los riesgos son muy bajos.

Para la construcción modular volumétrica en acero, se estima que los accidentes notificados se reducen en más del 80% (Lawson et al. 2012). Edificar fuera del emplazamiento, además de asegura un mejor control de la calidad de la construcción, proporciona una mayor

seguridad laboral. La reducción de procesos in situ elimina en gran medida los riesgos asociados. Los módulos se pueden instalar con barreras protectoras prefijadas o, en algunos casos, se proporciona una jaula protectora como parte del sistema de elevación. Pero, aun así, no hay que olvidarse que existen técnicas para la construcción de gran altura con estos módulos, lo cual aumenta el riesgo, además de tratarse de manipulación de metales. Por consiguiente, los riesgos serán mayores que en el caso de hormigón.

Para la construcción panelizada, debido a que, ambas formas están destinadas a edificación de media altura y el hecho de que en la obra se requieren más procesos de montajes, aumenta el riesgo levemente.

Dado que los FSS se realizan también para edificios de gran altura, el operario está en contacto con metales y manipulando conexiones y elementos pesados (vigas y columnas), estos sistemas serían los que peor verificarían la característica.

Por consiguiente, la característica **“Seguridad y salud”** queda:

- Volumétrico hormigón > Volumétrico acero = Paneles > FSS.

Percepción del usuario de calidad en diseño

La adopción del enfoque de construcción prefabricada promueve aspectos de sostenibilidad social, ya que tiene un gran potencial a través de la asequibilidad. Como se mencionó en el aspecto económico, la prefabricación puede reducir el coste total del proyecto, reducir el precio unitario y hacerlo más económico y socialmente aceptado. Uno de los beneficios de construir unidades asequibles es utilizarlas como una alternativa potencial para que los barrios humildes y los asentamientos informales logren un entorno construido sostenible.

Uno de los mayores retos del mercado modular es el estigma social. Mucha gente asocia la construcción modular con estructuras industrializadas poco atractivas y de baja calidad. Sin embargo, con las tecnologías avanzadas de manufactura (fabricación) la capacidad de modelaje de BIM permiten una gran variedad de aplicaciones mediante los métodos modulares actuales.

Como ya se ha dicho más de una vez, la percepción que recibe el usuario de las soluciones modulares es de provisionalidad y de poca calidad debida a su construcción rápida. Nada más lejos de la realidad. Si bien es cierto que el diseño estructural está algo limitado por los costes, la calidad de acabados interiores y exteriores y el diseño de lejos superan a la construcción tradicional, pero el usuario no percibe tal cosa debido a que simplemente, por poca expansión en el mercado de esta tecnología (Diego Gómez Muñoz 2008).

Los sistemas panelizados, realmente dejan poco margen de maniobra para el diseño de unas estructuras más modernas (que no sea el típico edificio rectangular) o con unos acabados exteriores difíciles de conseguir al tratarse de grandes paneles. En la misma línea siguen los módulos volumétricos, pero sólo en cuestiones de diseño constructivo, ya que los acabados y revestimientos se pueden conseguir cualesquiera. En el caso de los sistemas FSS tanto en hormigón como en acero se pueden conseguir unas construcciones totalmente iguales a las convencionales

Por tanto, la característica ***“Percepción del usuario de calidad en diseño”*** queda:

- FSS > Volumétricos > Paneles.

5.3.4. Aspectos estructurales

La altura y el volumen de obra son los factores más influyentes a la hora de decidirse por un método u otro. Muchos de los métodos industrializados no son admisibles para determinadas alturas. Ésta circunstancia se da para el caso de módulos de hormigón armado o sistemas panelizados, también de hormigón, los cuales aportan un sobrepeso considerable. Además, otros aspectos constructivos como son la existencia de grandes luces y espacios diáfanos limitan la competitividad de estos métodos. Como se ha visto en los apartados de construcción modular con acero, estos permiten construcciones de altura media con estructuras de soporte como por ejemplo el “podio” o para gran altura mediante núcleos.

Diseño resistente a sismicidad

Una de las condiciones de diseño que se ha de verificar y garantizar en la construcción es la continuidad de los pilares o paredes para una correcta transferencia de las fuerzas verticales. Por tanto, en la construcción prefabricada éste hecho juega un papel relevante. Una revisión del comportamiento sísmico y el comportamiento de las estructuras de hormigón prefabricado indica que los edificios diseñados y contruidos incorporando conceptos de diseño sísmico se desempeñan satisfactoriamente (Rahman and Rahman Sobuz 2018).

Los módulos volumétricos tienen un punto crítico, en caso de que se quiera más de una planta, que es el apilamiento de las cajas unas encima de otras y por consiguiente su correcta unión. Además, se ha de tener en cuenta que, al levantar varios pisos, se añade mucho peso propio al conjunto de la estructura ya que los forjados, por ejemplo, acaban siendo el doble de gruesos.

Con los sistemas de paneles prefabricados pasa algo parecido, pero en menor grado. Es cierto que la pantalla, en este caso de hormigón armado, es continua por lo tanto puede transmitir las fuerzas a los cimientos del edificio de igual forma que lo harían los pilares. Pero,

en este caso hay que prestar atención para ver de qué modo se realiza la unión en las aristas cada pareja de panel.

Por último, la prefabricación por componentes, que sí permiten una transmisión sin complicaciones, ya que garantizan la condición de diseño de pilares continuos. En este caso no se puede caer en la banalización de creer que por el hecho de que el acero sea más dúctil resistirá mejor a los efectos de las sismicidades que el hormigón. Son muchos los factores que influyen, cosa que no se va a tratar en este documento, pero hay que dejar claro que el desempeño resistivo irá ligado más a cómo se ha edificado en lugar de con qué.

Los elementos sobre los cuales son críticas las fuerzas de inercia, generadas por las sismicidades, son los forjados. Por consiguiente, cuanto mayor sea el número de plantas y el peso de los forjados (por lo tanto, el peso propio del edificio) mayor será la problemática para resolver. Durante una acción sísmica, en los forjados se generan fuerzas para las que no están diseñadas. Por norma general, cuanto más liviano y bajo sea la estructura mejor resistencia sísmica tendrá o los sistemas mixtos podio-modulares que disminuyen las fuerzas sísmicas.

Por consiguiente, la característica ***“Diseño resistente a sismicidad”*** queda:

- FSS de acero = Volumétricos de acero > FSS de hormigón > Volumétrico de hormigón = Paneles.

Diseño de revestimientos – Flexibilidad en las instalaciones – Flexibilidad de remodelación

Una de las grandes ventajas de los sistemas modulares volumétricos es su capacidad de llegar a la obra en un estado, prácticamente, de acabado final. Tanto las instalaciones del cubículo como todo el revestimiento vienen prediseñados y planificados según unas ciertas especificaciones, por tanto, permiten muy poco margen de modificación posterior o de personalización previa al gusto del cliente sin que esta suponga un gran desembolso. Mientras que, en los sistemas prefabricados por componentes, es posible establecer el diseño que más se adecue a las necesidades del cliente o su posterior rehabilitación (Jellen and Memari 2013).

En sistemas modulares pesados, que usan el hormigón prefabricado como material base, se dan múltiples ventajas frente a los sistemas modulares ligeros, que usan madera, acero u otros materiales como material base. Tanto en durabilidad, resistencia al fuego, aislamiento acústico, ahorro energético (inercia térmica), estabilidad y resistencia estructural (reducción de movimientos, deformaciones dinámicas y vibraciones, ideal para ubicaciones con riesgo sísmico), la capacidad del hormigón es mayor (Alex Hyams, Ed McCann 2018).

Por otro lado, en la edificación con los paneles metálicos, para colocar las instalaciones hay que raspar los paneles para poder pasar. Cosa que no pasa con la construcción con paneles de hormigón donde existe la posibilidad que las instalaciones y el aislante vayan incluidas en el panel, da a la larga mayor rapidez de construcción. Mientras que, en el caso de las estructuras metálicas, se dispone de la facilidad de pasar las instalaciones por los perfiles agujereados.

Según (Rahman and Rahman Sobuz 2018) el ahorro de trabajo en realizar las instalaciones en un sistema volumétrico representa el 70% mientras que el sistema de paneles individuales (FSS) un 30% respecto el convencional.

Los sistemas panelizados pueden venir de fábrica con la canalización para las instalaciones eléctricas ya incorporadas, lo cual ahorra mucho tiempo. Mientras que para los sistemas por componentes esto es mucho más difícil, ya que estos están más fragmentados y son enfocados a edificios de gran altura donde la distribución de las paredes con las canalizaciones es más dispersa.

Por consiguiente, las siguientes características quedan:

“Diseño de revestimiento”:

- Volumétrico hormigón = Paneles = FSS hormigón > Volumétricos acero = FSS acero.

“Flexibilidad en las instalaciones”:

- Volumétricos > Paneles > FSS.

“Flexibilidad de remodelación”:

- FSS > Paneles hormigón > Volumétricos = Paneles acero.

Flexibilidad constructiva

Los sistemas volumétricos, son con diferencia los más flexibles. Son fáciles de diseñar, ejecutar, remodelar o ampliar zonas habitables y además permiten un rápido desmantelamiento, si se dice el caso.

Según (Antonov et al. 2016) FSS tiene mayor flexibilidad arquitectónica y de planificación en todos los procesos de la construcción combinado con la posibilidad de modernización y redesarrollo del edificio durante el mantenimiento a bajo coste en frente a los grandes paneles.

Y en particular, en los sistemas FSS, las estructuras de acero permiten ajustes en las conexiones más precisos, pero menos rígidos (a no ser que se suelde, proceso más caro y laborioso) en comparación con el hormigonado. Además, estas estructuras disponen de una elevada ratio de peso soportado – peso propio. Son altamente resistentes a elevados pesos y trabajan tanto a tracción como a compresión. Por el contrario, su desventaja más remarcable es su pésimo comportamiento al fuego.

Por tanto, la característica **“Flexibilidad constructiva”** queda:

- Volumétricos > FSS > Paneles.

Flexibilidad de transporte de los elementos

Obviamente, el transporte de los elementos de hormigón al pesar más y siendo más frágil es más complicada y lenta en comparación con los de acero. Pero eso no significa que sea extrapolable a todos los sistemas. Por ejemplo, los módulos volumétricos, ya sean de hormigón o acero, presentan la misma dificultad al tratarse de un volumen ya definido que limita el espacio en el transporte.

Por consiguiente, la característica **“Flexibilidad de transporte de los elementos”** queda:

- FSS acero > Paneles = FSS hormigón > Volumétricos.

Altura edificable y Cargas de peso propio

El peso del elemento constructivo aquí tiene mucho que decir. Para conseguir una edificación de gran altura, el peso de los elementos constructivos ha de ser el menor posible ya que, de lo contrario, la carga propia del edificio sería exagerada lo cual daría lugar a múltiples problemas. Como ya se ha comentado en los capítulos anteriores.

Por un lado, el sistema volumétrico de hormigón es el que proporciona mayor peso propio por planta y por tanto menor altura edificable. En cambio, el sistema volumétrico de acero es su antítesis, presenta el menor peso propio y por consiguiente (con ayuda de unas técnicas determinadas de construcción de multiplanta, véase apartado 5.4.3 más adelante) se consiguen elevadas alturas. En general, todos los sistemas FSS permiten la construcción de edificios de muchas plantas con un peso propio por planta moderado. A lo que se refiere paneles, los de alma metálica aligeran el peso de la planta (más que los de hormigón) pero ambos comparten la misma altura edificable.

Por consiguiente, la característica **“Altura edificable”** queda:

- Volumétrico acero = FSS > Paneles > Volumétrico hormigón.

Y la característica **“Cargas de peso propio”**:

- Volumétrico hormigón = Paneles hormigón > FSS > Volumétrico acero = Paneles acero.

Nivel de uso de la tecnología

Haciendo una búsqueda en varios artículos sobre los estudios de construcción prefabricada, se ha llegado a la conclusión que, en Asia, en general, aunque ahora los países como Indonesia y China apuesten por este sistema, no hay mucho PPVC (Construcción modular Volumétrica Prefabricada y Prefinalizada). En cambio, en Europa, esta tecnología está más implantada, sobre todo en baja altura, pero aún sigue sin poder hacerle frente a las construcciones con hormigón ligero ya sea panel como estructura por. Por último, en los Estados Unidos, la construcción con paneles tiene un gran recorrido histórico y hoy en día tiene mucha fuerza en el mercado, junto con la tradicional construcción con estructuras de acero, tan características de las grandes ciudades.

5.4. Comparativa: Elección del sistema constructivo

Recopilando toda la información expuesta y analizada en el apartado anterior, en forma de tablas individuales de resumen para cada tipo de característica, se procede a la elaboración de una única tabla. Esta tabla englobará todas las características, vistas anteriormente, en función de cada tipo de sistema prefabricado analizado. Para ello, son definidos tres niveles: nivel bajo que viene representado por el color rojo; nivel medio o moderado representado por el color amarillo; y por último el nivel alto representado por el color verde. Es importante recalcar que una característica de una metodología constructiva con un nivel bajo (rojo) no significa que sea peor en comparación con la construcción tradicional. De hecho, para a mayoría de las características, los sistemas constructivos industrializados presentan unas mejoras considerables. La tabla resultante es expuesta a continuación, Tabla 5.17: Comparación de los sistemas constructivos prefabricados en función de las características, estructurales y sostenibles, esenciales. Además, se presenta la Tabla 5.17b, donde se reordenan las características tal que quede claro un patrón según la escala de colores.

Para elegir correctamente el sistema constructivo que más conviene para este proyecto, se basará en las siguientes premisas: que permitan una altura edificable grande, un retorno de la inversión rápida y por consiguiente, un beneficio económico alto y por último, que el impacto ambiental sea el mínimo. Gracias a la Tabla 5.17b, se puede observar que, en general, el nivel alto se centra en los módulos volumétricos, el nivel medio en los paneles estructurales portante y que la estructura prefabricada por componentes es la que menos niveles bajos presenta, además, de una gran cantidad de características de nivel medio y alto, haciéndola muy competitiva.

Los sistemas que mejor cumplen con el aspecto económico son los modulares volumétricos. Los aspectos estructurales también son desempeñados notablemente, en especial los sistemas volumétricos en acero, que proporcionan una carga de peso propio por planta muy baja y además, permiten una construcción de gran altura. Por último, el sistema volumétrico en acero es el sistema que mayores reducciones presenta en las características de impacto ambiental. Si bien es cierto que el ahorro en el consumo energético que es muy bajo, éste puede ser disminuido al aumentar la industrialización y la fabricación de los módulos en serie debido a que se planea levantar un edificio alto.

Así pues, el sistema escogido mediante el cual se elaborará la construcción de un edificio de gran altura, de más de 10 plantas será el sistema modular volumétrico en acero. Se va a emplear, por tanto, la Construcción Volumétrica Prefabricada Pre-finalizada (PPVC sus siglas en inglés).

Leyenda: Nivel bajo : ● Nivel medio : ● Nivel alto : ●	Características	Módulos volumétricos		Paneles estructurales portantes		Estructura prefabricada por componentes	
		Hormigón	Acero	Hormigón	Acero	Hormigón	Acero
Aspecto estructural	Flexibilidad instalación de servicios	●	●	●	●	●	●
	Flexibilidad constructiva	●	●	●	●	●	●
	Diseño del revestimiento (impermeabilización, resistencia al fuego)	●	●	●	●	●	●
	Diseño resistente a sismicidad	●	●	●	●	●	●
	Cargas de peso propio (por planta)	●	●	●	●	●	●
	Altura edificable	●	●	●	●	●	●
	Flexibilidad de remodelación (estructural y servicios)	●	●	●	●	●	●
Aspecto económico	Nivel de construcción off-site	●	●	●	●	●	●
	Ahorro de mano de obra	●	●	●	●	●	●
	Ahorro de Tiempo en la construcción	●	●	●	●	●	●
	Beneficios económicos	●	●	●	●	●	●
	Flexibilidad de transporte de elementos	●	●	●	●	●	●
	Ahorro de costes generales de construcción	●	●	●	●	●	●
Aspecto ambiental	Reducción de residuos en la obra	●	●	●	●	●	●
	Reducción Emisiones de CO ₂	●	●	●	●	●	●
	Ahorro Consumo energético	●	●	●	●	●	●
	Ahorro Consumo de agua	●	●	●	●	●	●
	Ahorro Consumo de materiales	●	●	●	●	●	●
Aspecto social	Reducción de ruido y polvo	●	●	●	●	●	●
	Reducción Ocupación de la vía	●	●	●	●	●	●
	Percepción usuario de calidad en diseño	●	●	●	●	●	●
	Seguridad y Salud	●	●	●	●	●	●
Uso de la tecnología	Nivel de uso en Europa	●	●	●	●	●	●
	Nivel de uso en E. U. A	●	●	●	●	●	●
	Nivel de uso en Asia	●	●	●	●	●	●

Tabla 5.17 Comparación de los sistemas constructivos prefabricados en función de las características estructurales y sostenibles esenciales. Fuente: Elaboración propia.

Leyenda: Nivel bajo : ● Nivel medio : ● Nivel alto : ●	Características	Módulos volumétricos		Paneles estructurales portantes		Estructura prefabricada por componentes	
		Hormigón	Acero	Hormigón	Acero	Hormigón	Acero
Reducción de residuos en la obra		●	●	●	●	●	●
Reducción de ruido y polvo		●	●	●	●	●	●
Flexibilidad instalación de servicios		●	●	●	●	●	●
Nivel de construcción off-site		●	●	●	●	●	●
Diseño del revestimiento (impermeabilización, resistencia al fuego)		●	●	●	●	●	●
Ahorro de mano de obra		●	●	●	●	●	●
Reducción Emisiones de CO ₂		●	●	●	●	●	●
Ahorro de Tiempo en la construcción		●	●	●	●	●	●
Beneficios económicos		●	●	●	●	●	●
Flexibilidad constructiva		●	●	●	●	●	●
Reducción Ocupación de la vía		●	●	●	●	●	●
Percepción usuario de calidad en diseño		●	●	●	●	●	●
Diseño resistente a sismicidad		●	●	●	●	●	●
Ahorro Consumo energético		●	●	●	●	●	●
Flexibilidad de remodelación (estructural y servicios)		●	●	●	●	●	●
Ahorro de costes generales de construcción		●	●	●	●	●	●
Flexibilidad de transporte de elementos		●	●	●	●	●	●
Ahorro Consumo de agua		●	●	●	●	●	●
Altura edificable		●	●	●	●	●	●
Cargas de peso propio (por planta)		●	●	●	●	●	●
Ahorro Consumo de materiales		●	●	●	●	●	●
Seguridad y Salud		●	●	●	●	●	●
Nivel de uso en Asia		●	●	●	●	●	●
Nivel de uso en Europa		●	●	●	●	●	●
Nivel de uso en E. U. A		●	●	●	●	●	●

Tabla 5.17b. Comparación de los sistemas constructivos prefabricados en función de las características estructurales y sostenibles esenciales. Reordenado. Fuente: Elaboración propia

5.4.1. Ventajas y desventajas de la implementación modular volumétrica en acero

Los sistemas de construcción modular brindan varias oportunidades para mejorar la sostenibilidad del proyecto en términos del proceso de construcción y el desempeño del edificio terminado.

El principal problema es la falta de competencia en el mercado modular. La fabricación de módulos volumétricos requiere de una fuerte inversión inicial. Cuenta con unos gastos generales relativamente altos asociados con el funcionamiento de la fábrica, además de la necesidad de una mano de obra fija especializada. Estos factores hacen que los costes de implantación de los módulos sean elevados. Por consiguiente, los proveedores necesitan, sobre todo, un flujo constante de demanda de prefabricados lo que daría lugar a un aumento de competencia en el mercado y ésta a su vez a la disminución de los precios.

Los ahorros económicos se asocian con las eficiencias de instalación y la estandarización de los espacios. El tiempo de construcción más corto induce costes generales más bajos, la apertura más temprana de la nueva instalación genera una mayor tasa de retorno de la inversión. Los precios cerrados permiten un estricto control de costes.

A causa de que la construcción modular puede producirse simultáneamente con la construcción in situ, se da una mejora de los rendimientos globales de la obra. Aunque, este tipo de construcciones exigen asegurar una absoluta precisión en el dimensionado y en la edificación, ya que las correcciones posteriores en la obra son muy complicadas de arreglar y por ello ocasionan desviaciones en tiempo y coste muy importantes. La planificación del espacio, el diseño detallado y la integración del servicio deben completarse antes de la puesta en marcha de la obra. Es de vital importancia una correcta coordinación dimensional y planificación.

Además, la influencia de las condiciones climatológicas apenas tiene incidencia (paradas imprevistas) cosa que mitiga el riesgo de retrasos por inclemencias del tiempo. Entre un 60 – 90% de la construcción se termina dentro de la fábrica (Alex Hyams, Ed McCann 2018). El número de visitas al sitio por parte de los vehículos de entrega se reduce hasta en un 70% (Lawson et al. 2012). La reducción de la contaminación acústica y contaminación del aire mejoran la protección y la seguridad.

Las viviendas modulares se construyen para satisfacer o exceder la misma normativa y estándares que las viviendas tradicionales. Los mismos materiales especificados y utilizados en las estructuras convencionales, madera, cemento y acero, son usados también en los proyectos de las construcciones modulares.

La estanqueidad y el rendimiento térmico del tejido del edificio pueden ser mucho más altos de lo que generalmente se logra in situ debido a las tolerancias más estrictas de las uniones que se pueden lograr en un entorno de fábrica. El aislamiento acústico mejora en gran medida por la construcción de doble capa. El control de calidad se hace en fábrica, mucho más fiable y riguroso que si se hiciese en obra.

La restricción más obvia va ligada al tamaño del módulo para que puedan ser transportados en un camión. También hay un límite de altura a la que se pueden apilar las unidades, aunque el límite depende del tipo de módulo y la forma de construcción.

Muchos tipos de fachadas y acabados utilizados en la construcción modular crean una percepción de módulos puramente funcionales para un tiempo limitado. Sin embargo, se pueden lograr acabados de alta calidad.

5.4.2. Construcción multiplanta con PPVC en acero

De por sí, los módulos volumétricos no permiten una edificación de múltiples plantas, debido tanto a la forma de conexión entre ellas como a las acciones generadas por peso propio. Pero, sí que existen técnicas y métodos que permiten la construcción de edificios de media y gran altura.

La resistencia a las fuerzas horizontales, como las cargas de viento, y la robustez a las acciones accidentales, se vuelve cada vez más importante con la escala del edificio. Las estrategias empleadas para garantizar la estabilidad adecuada de los montajes modulares, en función de la altura del edificio, son:

1. Acción de diafragma de paneles o refuerzos dentro de las paredes de los módulos, adecuados para edificios de 4 a 6 pisos.
2. Estructura reforzada separada, utilizando componentes de acero laminados en caliente ubicados en el área de los ascensores y de la escalera, utilizados para edificios de 6 a 10 plantas.
3. Núcleo de hormigón armado o de acero, adecuado para edificios más altos.

Los módulos están unidos en sus esquinas para que estructuralmente actúen juntos para transferir cargas de viento y para proporcionar rutas de carga alternativas en caso de que un módulo sufra daños severos.

5.4.3. Acción estructural

El comportamiento estructural de un conjunto de módulos es complejo debido a la influencia

de las tolerancias en el procedimiento de instalación, las múltiples interconexiones entre los módulos y la forma en que las fuerzas se transfieren a los elementos estabilizadores, como los soportes verticales o las paredes centrales. Los factores clave a tener en cuenta en el diseño de edificios modulares de gran altura son:

- La influencia de las excentricidades de instalación y las tolerancias de fabricación en las fuerzas y momentos adicionales en las paredes de los módulos (Lawson and Richards 2010).
- Mecanismo de transferencia de fuerza de cargas horizontales al sistema de estabilización, que generalmente es un núcleo de hormigón (el método más usado).
- Robustez ante acciones accidentales (también conocida como integridad estructural) para sistemas modulares.

En los sistemas modulares con muros de carga, la carga axial se transfiere por vía directa de pared a pared portante. Las excentricidades en la fabricación e instalación de los módulos provocan una acumulación adicional de momentos y acentúa las tensiones locales en la base de la pared. Por consiguiente, son utilizados principalmente los módulos portantes en esquinas con secciones en C. Dos capas de placas de yeso o placas similares se unen a la cara interna de la pared mediante tornillos. El tablero de partículas de cemento (CPB) o el panel de fibra orientada (OSB) a menudo se adhieren al exterior de las paredes de los módulos. Estas placas restringen las secciones en C contra el pandeo.

La capacidad de un conjunto de módulos para resistir cargas aplicadas en caso de daños graves a un módulo en un nivel inferior depende del desarrollo de fuerzas de enlace en las esquinas de los módulos. Para satisfacer la "robustez" en caso de daño accidental a uno de los módulos, las fuerzas de enlace entre los módulos adyacentes se pueden establecer sobre la base de un modelo simplificado en el que el módulo es sujetado por los módulos vecinos. Para propósitos de diseño, se recomienda (Lawson and Ogden 2008) que la fuerza horizontal mínima en cualquier enlace entre los módulos se tome no menos del 30% de la carga total que actúa sobre el módulo y no menos de 30 kN (3 toneladas).

A medida que aumenta la altura de una estructura, aumenta la magnitud de las cargas totales de gravitatorias y laterales y, por lo tanto, el tamaño de los elementos de soporte de carga en los módulos inferiores tendrá que ser mayor que lo que se necesita solo para las cargas de gravitatorias. Además, el diseño de edificios modulares de gran altura está fuertemente influenciado por los requisitos estructurales, de incendio y de servicios.

Cuando una estructura de múltiples compartimentos sufre cargas laterales, las columnas o paredes en compartimentos adyacentes tienden a deslizarse entre sí, si no se unen

correctamente. En los edificios de construcción tradicional, las conexiones de elementos horizontales y verticales están diseñadas para la combinación de cargas de gravitatorias y laterales. La continuidad entre los elementos horizontales y verticales está asegurada y por tanto, proporciona la integridad de la estructura. Sin embargo, debido a la discontinuidad entre los módulos en la construcción de edificios modulares, éstos deben estar conectados entre sí en la dirección vertical para resistir las fuerzas cortantes (causadas por cargas laterales) entre los módulos.

La Figura 5.1 muestra la diferencia en los modos de deflexión entre los dos sistemas cuando los sistemas adyacentes portantes de carga vertical no están vinculados entre sí y cuando lo están. En la figura de la izquierda, no hay acoplamiento de deformación vertical entre los componentes adyacentes, mientras que la figura de la derecha muestra la transferencia de la cortante vertical entre dichos componentes.

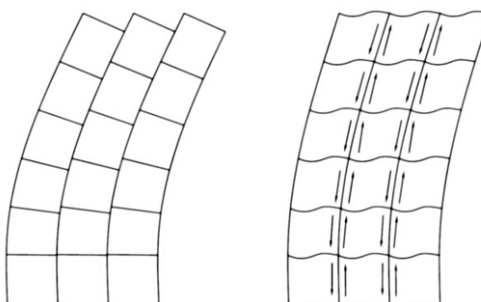


Figura 5.1 Transferencia vertical de la cortante entre unidades apiladas. Lado izquierdo: sin transferencia vertical. Lado derecho: con transferencia (juntas verticales acopladas). Fuente: (Ramaji and Memari 2013).

Debido a que la construcción con módulos volumétricos de acero es relativamente nueva, con una comprensión limitada del rendimiento estructural en condiciones de carga extremas, la mayoría de las aplicaciones de construcción modular de varios pisos se encuentran actualmente en edificios de poca altura o en áreas con un potencial de riesgo natural menor.

Los edificios modulares multiplanta con sus propias características plantean desafíos únicos. La investigación existente disponible aún es muy limitada sobre los diferentes tipos de estos sistemas, en particular, no hay criterios de diseño específicos. Además, debido a la naturaleza compleja de los componentes estructurales y las conexiones de los edificios modulares, los modelos y análisis estructurales son más complicados en comparación con los edificios convencionales (no modulares).

Considerando los aspectos estructurales, se pueden clasificar en cuatro grupos:

- Sistema híbrido podio modular
- Sistema con estructura convencional
- Sistema con núcleo de hormigón

5.4.4. Definición de los métodos constructivos

Sistemas híbridos podio-modulares

La construcción modular se puede combinar con estructuras de acero u hormigón para ampliar la flexibilidad en la planificación del espacio. Una adaptación de la tecnología modular es diseñar un "podio" o estructura de plataforma en la que se colocan los módulos. De esta manera, se puede proporcionar espacio abierto para uso comercial o para estacionamientos subterráneos. Las plantas inferiores se construyen utilizando estructuras de acero convencionales o estructuras de hormigón con largos vanos. Luego, la parte modular del edificio se instala en la parte superior del podio. Los módulos transfieren su carga uniforme a las vigas del podio. Además, una estructura de podio con vanos largos conduce a una disminución de las fuerzas sísmicas de diseño. Las vigas de soporte deben alinearse con las paredes de los módulos y las columnas generalmente están dispuestas en una cuadrícula de 6 a 8 metros.

En la Figura 6.3 (Lawson and Richards 2010) se muestra un dibujo esquemático de un sistema de podio de 2 pisos. Como se muestra en esta figura, los bordes de los módulos están alineados con el centro de las vigas del podio para omitir la excentricidad de la carga en las vigas y columnas del podio.

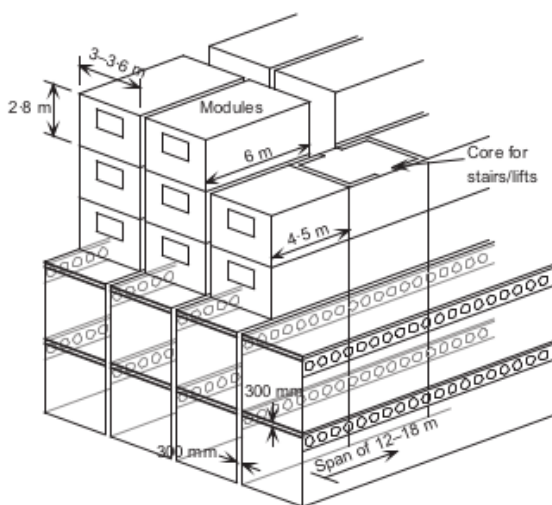


Figura 5.2 Sistema de podio de 2 plantas bajo una construcción modular multiplanta. Fuente: (Lawson and Richards 2010)

Sistema con estructura de arriostramiento

En este sistema, la estructura principal del edificio no está construida como apilamiento de unidades volumétricas. Como se muestra en la Figura 5.3, *Contemporary Resort Hotel de Disneyland*, construido en 1971. La estructura principal, es una estructura de arriostramientos

de acero. Debido al hecho de que la estructura principal es la que soporta las cargas, los módulos pueden estar diseñados solo para soportar sus propios pesos, por tanto, Las unidades modulares pueden estar hechas de materiales más ligeros.

A pesar del hecho de que la estructural principal es la que transmite las cargas laterales, la conexión entre los módulos y la estructura debe ser lo suficientemente fuerte como para poder transferir las cargas de gravitatorias y las cargas sísmicas, que resultan de la aceleración de la masa de los módulos. Al modelar un sistema de este tipo, también se debe considerar un diafragma adecuado para la integración adecuada de los módulos y la estructura principal.



Figura 5.3 Estructura principal de refuerzo en acero para módulos. Hotel Contemporary Resort en Disneyland.

Sistema con núcleo de hormigón

En general, debido a problemas de montaje e instalación, los módulos prefabricados deben ser ligeros (por ejemplo, módulos de acero de poco espesor) y, como resultado, tendrán una menor rigidez lateral en comparación con las estructuras normales. Sin embargo, los muros y estructuras convencionales de hormigón a cortante y la estructura de acero reforzado tienen mayor rigidez lateral en comparación con los módulos prefabricados. Al instalar uno o más de estos sistemas rígidos entre los módulos como núcleo, pueden reducir las deformaciones laterales de toda la estructura.

La construcción de núcleo de hormigón es el sistema estructural más común utilizado para la construcción modular de gran altura. Los núcleos se pueden construir in-situ con hormigón armado o pueden ser prefabricados y ensamblados a posteriori.

Los núcleos de hormigón son usados para transferir cargas laterales y proveer de entrada a la planta en estructuras de altura media y elevada. Normalmente, desde el punto de vista del diseño de un edificio, los módulos se organizan alrededor de un núcleo estable de una de las dos formas.

- Una agrupación “*cluster*” de módulos, conectados entre sí a través de conexiones

integradas, alrededor del núcleo central, como se ilustra en la Figura 5.4 a).

- Una disposición de módulos “*corridor*”, donde bordean un pasillo común y son unidos mediante elementos de soporte. Se accede a los módulos desde los pasillos a ambos lados del núcleo, como se ilustra en la Figura 5.4 b).

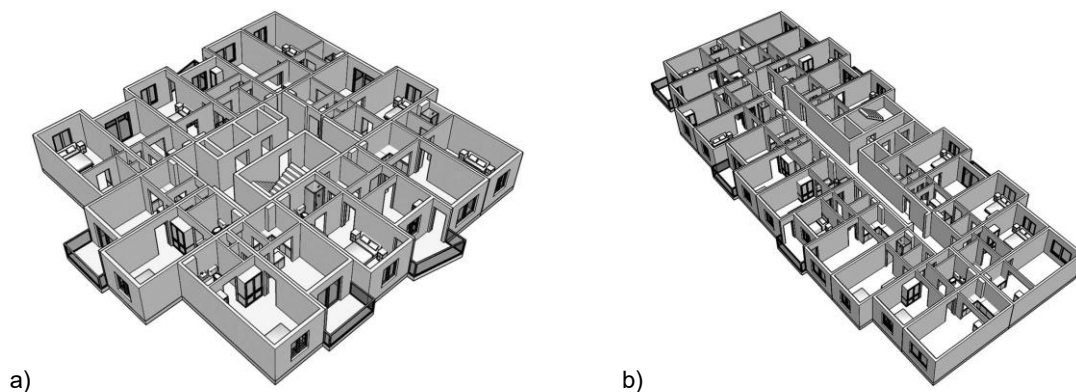


Figura 5.4 a) Distribución típica de módulos alrededor de un núcleo. b) Distribución típica de módulos a lo largo un pasillo. Fuente: (Lawson et al. 2012)

Bajo cargas laterales, los diafragmas horizontales transferirán la mayoría de las cargas laterales a las partes más rígidas (núcleo) de la estructura. Por lo tanto, la conexión entre la estructura central y los módulos debe ser lo suficientemente fuerte como para transferir las tensiones de compresión y las cargas verticales entre estas dos estructuras. En la Figura 5.5 se representa la planta de un edificio modular de 11 pisos, Como se muestra en dicha figura, se pueden apreciar 4 núcleos en el plano que resisten las cargas laterales aplicadas (Lawson et al. 2012).

Por consiguiente, ya que la idea principal de este trabajo es la construcción de un edificio de gran altura, es decir más de 10 plantas, el sistema de construcción modular volumétrico prefabricado (PPVC) en acero será la última vista, es decir, sistema con núcleo de hormigón.

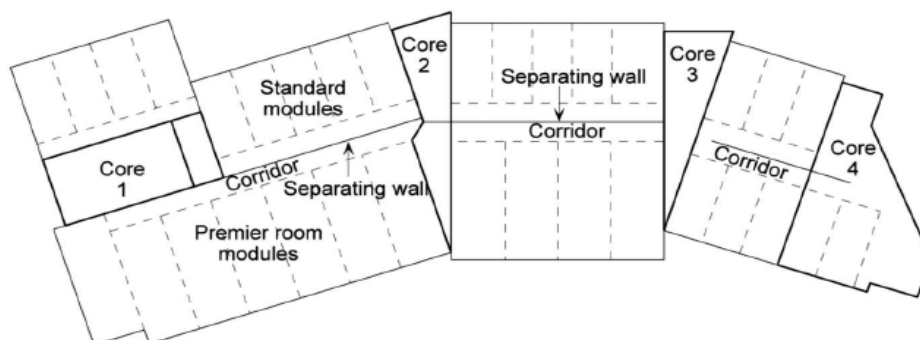


Figura 5.5 Disposición de núcleo en planta de una construcción de 12 plantas. Fuente: (Lawson et al. 2012).

5.4.5. Desafíos y problemática constructivos

Al igual que con cualquier sistema relativamente nuevo, el comportamiento estructural desconocido y la falta de diseños específicos, directrices constructivas y códigos de requerimientos son las razones principales por las que aún se es reticente a optar por edificios de construcción modular. Con el fin de hacer que el edificio modular de varios pisos sea un sistema más popular y fiable, se deben abordar cuidadosamente los problemas desafiantes de los aspectos estructurales.

Al desarrollar el modelado por ordenador, se deben considerar los siguientes problemas: la definición de carga, el modelado de módulos, la definición de elementos y la identificación de cargas durante la construcción.

Además, existen algunos desafíos importantes en el diseño estructural del edificio, incluidos los siguientes: módulos individuales de diafragma horizontal, diafragma completo del piso del edificio, continuidad en el plano vertical y conexión de unidades.

El grado de importancia de los desafíos mencionados anteriormente puede variar según la condición del lugar de la obra y los desastres naturales en la región para ser considerados en el diseño. Por ejemplo, en lugares que no están expuestos a tormentas y terremotos, se reduce el factor de importancia de algunos elementos, como los diafragmas y las conexiones verticales.

En los modelos estructurales convencionales, generalmente se asume que todos los elementos en un nivel de forjado determinado están ubicados en un solo plano, que es el nivel del diafragma. Pero, como se muestra en la Figura 4.2, los tipos de edificios con módulos apilados, la parte inferior de los módulos superiores no se encuentra en el mismo plano que la parte superior de los módulos inferiores; sólo están vinculados entre sí en algunos puntos. En otras palabras, hay una diferencia de elevación entre el techo de una planta y el suelo de la siguiente; y esto debe ser abordado en el modelo. Se debe considerar dos planos diferentes ligeramente espaciados para que el suelo y el techo conectan las uniones superiores e inferiores de estos elementos en un número suficiente de puntos para garantizar la continuidad y la integridad. En la Figura 5.6 a) se muestra un ejemplo del modelo de elementos finitos para representar el diafragma en tales sistemas.

Además de los problemas específicos relacionados con cada sistema estructural de edificios modulares de varios pisos, hay algunos problemas comunes que también deben abordarse en todos los diferentes tipos de estas estructuras.

Poder diseñar una construcción modular y proceder al cálculo de la estructura es una tarea bastante complicada, pero para lograrlo una forma es recurriendo a los elementos finitos (Ramaji and Memari 2013). El modelado detallado de elementos finitos de edificios modulares

completos es complicado debido a la variedad de tipos de juntas y soportes con propiedades de deformación - carga desconocidas. Para la aplicación práctica del modelado de elementos finitos de sistemas modulares, se necesitan algunas suposiciones de simplificación. Por ejemplo, un enfoque de modelado de dos niveles será una opción donde para el nivel uno, cada módulo se puede simplificar y asumir como una sub-estructura 3D como se muestra en la Figura 5.6 b) para la representación con los elementos finitos de los módulos con paredes de carga y los soportados en esquinas. Las K_c , K_{bf} , K_{bc} y K_j representan, respectivamente, la rigidez de los componentes verticales, los elementos horizontales a nivel del suelo, los elementos horizontales a nivel del techo y las juntas.

Una vez que todo el edificio haya sido modelado utilizando sub-subestructuras 3D, la estructura puede ser sometida a cargas aplicables y ser analizada. Las fuerzas que las sub-estructuras experimentan pueden utilizarse para un modelado de segundo nivel más detallado. Usando las fuerzas resultantes del análisis de todo el modelo constructivo (modelado de primer nivel) y aplicándolas en un modelo de elementos finitos más detallado (de segundo nivel) a cada módulo, se pueden diseñar los elementos internos de los módulos como son las vigas, columnas, soportes y refuerzos o muros resistentes al cortante, etc.

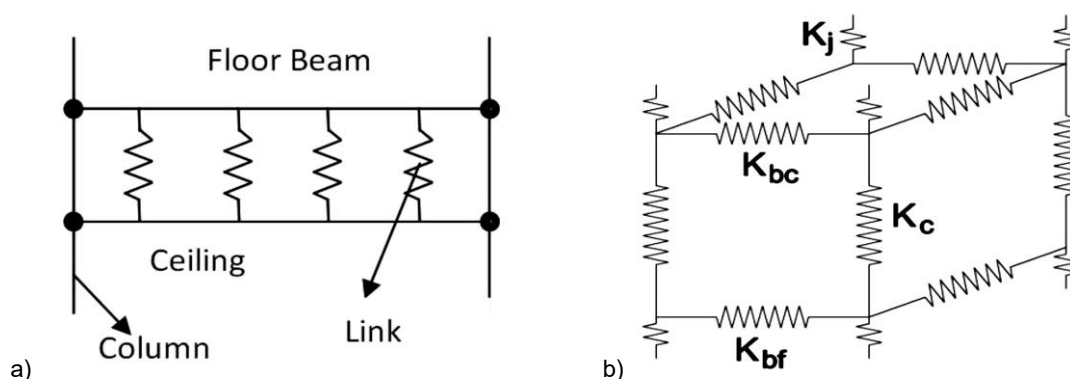


Figura 5.6 a) Ejemplo de un modelo de elementos finitos para el suelo de un módulo. b) Modelo 3D de rigidez de elementos finitos. Fuente: (Ramaji and Memari 2013).

La seguridad y la solidez de las estructuras son factores importantes que se deben tener en cuenta en el diseño de las estructuras. Puede haber muchas situaciones que podrían provocar el fallo de algunos módulos. Algunas de estas situaciones son fallos en la fábrica donde se ensamblan los módulos, los daños durante el montaje o el transporte, los fallos debido a un incendio o una explosión. Por lo tanto, los elementos y las conexiones deben tener suficiente redundancia para evitar fallos repetitivos o colapso progresivo de la estructura, cuando algunos de los módulos fallen. En consecuencia, los módulos deben tener una integridad fiable y la continuidad necesaria para poder soportar las cargas transferidas desde los módulos que hayan fallado. Se deben agregar algunas fuerzas internas a los elementos del módulo o, como alternativa, aumentar los factores de seguridad.

Algunos estudios demuestran que la construcción modular se puede utilizar para edificios residenciales de hasta 25 plantas (el uso de acero varió de 67 a 117 kg/m²) siempre que la estabilidad bajo el viento se logre mediante un núcleo con estructura de hormigón o acero. El diseño de los muros de carga o los pilares de las esquinas debe tener en cuenta los efectos de las excentricidades debidas a las tolerancias de fabricación e instalación (Lawson et al. 2012).

5.4.6. Selección de tipo de módulo volumétrico de acero

Los módulos volumétricos de acero, como se vio en el apartado 4.1.2, presentan dos formas; módulos de paredes portantes y módulos de esquinas portantes. Las características, ventajas e inconvenientes de cada una, ya fueron larga y tendidamente explicadas, pero ahora se va a definir cuál de estos dos será finalmente seleccionado para su diseño y posterior propuesta de edificio modular de gran altura mediante el módulo seleccionado.

Así pues, el módulo volumétrico de acero será el módulo de esquinas portantes, por las siguientes razones:

- Éstas son más estudiadas y por tanto, se dispone de más información sobre ellas.
- Existen más precedentes de edificios residenciales de gran altura contruidos con estos módulos, con lo cual se facilita el punto de partida.
- Al reducirse el módulo básicamente a una estructura porticada, se facilita enormemente la modelización, el cálculo y diseño del susodicho.
- Permiten mayor grado y flexibilidad, en la configuración del ensamblaje y acoplamiento, en el diseño de las plantas del edificio.

6. Propuesta de diseño del edificio de gran altura

6.1. Diseño del módulo volumétrico

Para diseñar adecuadamente el módulo volumétrico, se tiene que dimensionar en función de las reacciones generadas en el edificio modular. Para ello se tiene que definir dicho edificio. En el artículo (Lawson et al. 2012), se expuso la utilización de estos módulos en un edificio residencial 25 plantas, así pues, en principio, no se tienen que dar mayores problemas si este proyecto se decanta por un edificio modular de 20 plantas. Como primer parámetro de entrada (inputs) predefinidos, se toman los siguientes criterios:

- El tamaño del módulo será el mayor posible, tal que se reduzca el número de éstos en el ensamblaje de una vivienda y por consiguiente, de toda la planta del edificio. Por otro lado, el módulo tiene que poder ser transportable mediante un camión. Se toma una altura estándar de 3 m.
- La estructura del módulo será rectangular de relación 2:1 (largo/ancho), tal que el montaje y el ensamblaje sea preciso y más fácil. Por consiguiente, la caja estructural resultante será un ortoedro.
- El módulo será un sistema de esquinas portantes, además, no dispondrá de arriostras u otros perfiles de refuerzo ya sean diagonales o verticales. Únicamente vigas y pilares.
- Se diseñará únicamente un tipo de módulo que será el de mayores solicitaciones, para facilitar la industrialización de éstos. Dado que la deformación del edificio será restringida por el núcleo resistente central, que se dimensionará más adelante, los módulos de la primera planta tendrán que ser quienes soporten toda la carga gravitacional del edificio.

Por tanto, los criterios iniciales, se propone, basándose en (Lawson and Richards 2010) y (Lawson et al. 2012) un módulo de dimensiones 7,2x3,6x3 m. Los perfiles de predimensionado serán; pilares SHS 100x100x10 mm y vigas sección C 75x1,6 mm, en ambos casos el material será acero S355. Por consiguiente, se puede empezar por una rápida comprobación del predimensionado del módulo.

En la Figura 6.1, de más abajo, se muestra el diagrama de flujo del proceso que se seguirá, con los correspondientes inputs y condicionantes, para dimensionar adecuadamente tanto el módulo volumétrico como el núcleo resistente. Además, se muestran los resultados (outputs) que se obtendrán al final de este capítulo.

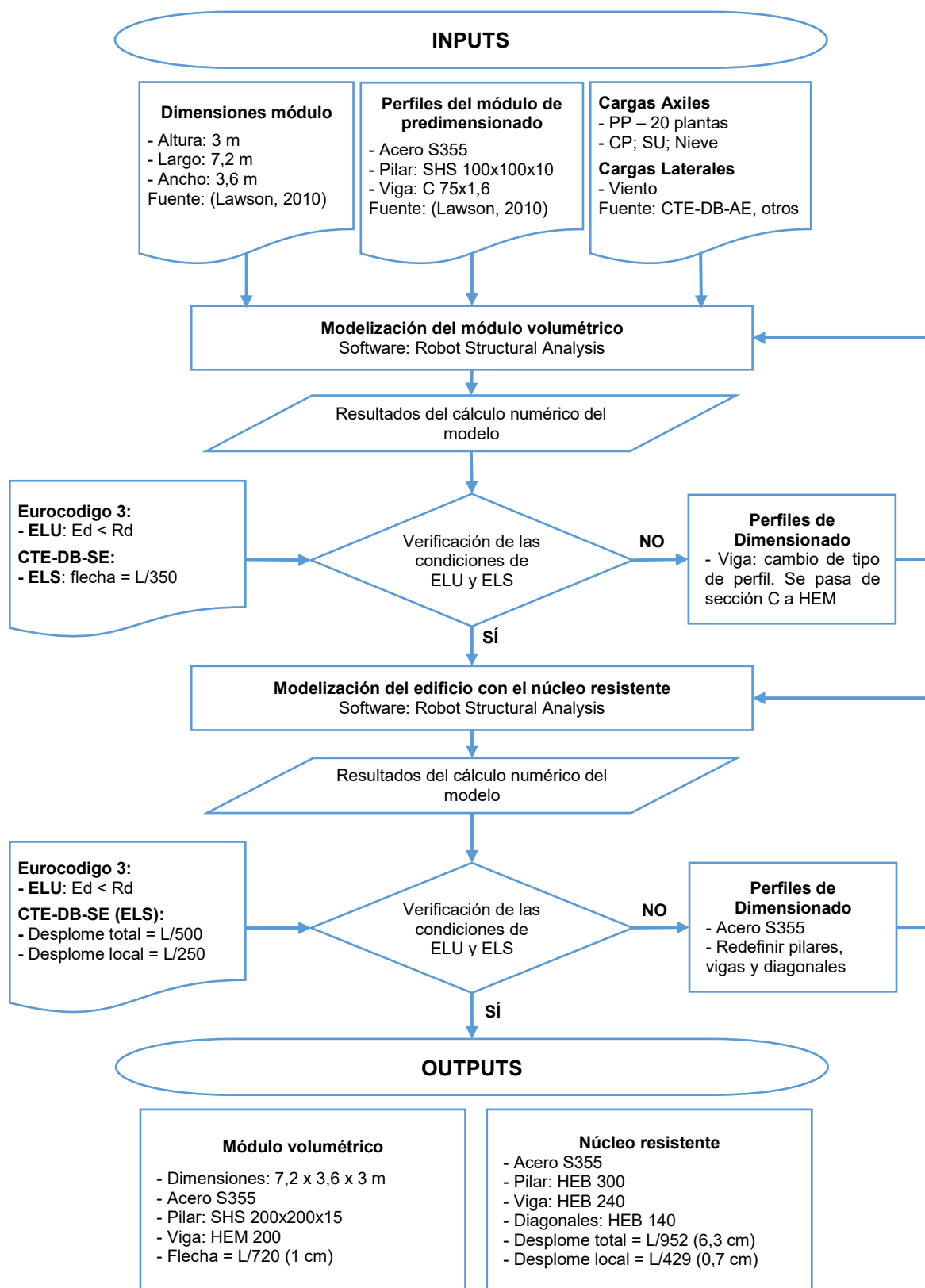


Figura 6.1: Diagrama de flujo del proceso de dimensionamiento del módulo y el núcleo resistente. Fuente: Elaboración propia.

6.1.1. Análisis y definición del módulo prefabricado

Método de cálculo

El método utilizado para el análisis estructural del proyecto es el modelaje 3D de la estructura en un programa de cálculo por elementos finitos (Robot Structural Analysis).

Se procede al estudio del módulo prefabricado de forma aislada para determinar su composición y un segundo modelo, en el que se incluye todo el edificio del proyecto para evaluar la estabilidad global del conjunto y dimensionar los elementos estructurales del núcleo rígido central.

Estado de cargas

Se determinan una serie de hipótesis simples para definir el estado de cargas del módulo, definido en la Tabla 6.1.

Hipótesis Simples		Carga
1	Peso Propio (PP)	El programa define por si solo el peso propio de la estructura utilizada
10	PP_Forjado	Se establece el peso del forjado colaborante: 3,67 kN/m ² de acuerdo al catálogo Haircol 59-FC de (Europerfil 2014).
11	PP_Fachada	Carga lineal de la fachada. De una altura de h = 3m, apoya la mitad en cada viga del módulo. 1,65 kN/m, calculado a partir de la información proporcionada en el DAU 14/082.
20	Carga Permanente	Carga definida de acuerdo a (CTE-DB-SE-AE 2009), 2,00 kN/m ²
30	Sobrecarga de Uso	Carga definida de acuerdo a (CTE-DB-SE-AE 2009), 2,00 kN/m ²

Tabla 6.1. Hipótesis de estado de cargas del módulo. Fuente: Elaboración propia.

Se establecen las cargas gravitacionales para la definición de los elementos estructurales. A continuación las combinaciones de hipótesis de acuerdo a (CTE-DB-SE 2009), expresados en la Tabla 6.2.

Combinación de hipótesis	Nombre	Definición
200	ELS	$(1+10+11+20+30)*1,00$
300	ELU	$(1+10+11+20)*1,35+30*1,50$

Tabla 6.2. Combinación de las cargas en los Estado Límite de Servicio y Uso. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se utilizan como factores de seguridad para el cálculo de Estado Límite Último, de valor 1,35 para las cargas permanentes y 1,50 para las cargas variables. Los coeficientes de minoración del material son utilizados internamente por el software Robot

Structural Analysis de acuerdo con el Eurocódigo 3.

Una vez definido el estado de cargas se determina la reacción de cada hipótesis simple para establecer el peso total del edificio de 20 plantas multiplicando dicha reacción por 19. De esta manera se consigue determinar la sección del pilar más solicitado del proyecto. La siguiente tabla, Tabla 6.3, muestra los valores de las cargas en kN de cada hipótesis simple. Estos valores fueron proporcionados por el programa mismo al aplicarle al módulo diseñado las cargas superficiales definidas anteriormente.

Por ejemplo, el peso total de la estructura de un módulo es de 5497,6 kg. El perfil que tiene la función de soportar la carga gravitatoria, debida peso de los módulos, es el pilar de cada esquina. Por consiguiente, en haber 4 pilares, se divide el peso total entre 4 se obtiene 1374,4 kg y si ahora se multiplica dicho valor por la gravedad, tomando $9,81 \text{ m/s}^2$, se obtiene exactamente 13.482,86 N, es decir, 13,48 kN. Ahora solo queda multiplicar por número de módulos que tiene por encima, el módulo más solicitado, que obviamente es el módulo de más abajo del todo, por tanto, se multiplica por 19, lo que da una carga debida al peso propio de la estructura de 256,12 kN que se le ha aplicado a cada pilar. Otro ejemplo seria la definición de la sobrecarga de uso. Se definió una carga superficial de 2 kN/m^2 , teniendo en cuenta que la superficie horizontal del módulo es de $7,2 \times 3,6 \text{ m}$, lo que hace $25,92 \text{ m}^2$, la carga obtenida es de 51,84 kN, que también tiene que dividirse entre 4, para cada pilar, lo que da una carga resultante de 12,96 kN.

	Hipótesis Simples	Carga
1	Peso Propio (PP)	$13,48 \text{ kN} \times 19 = 256,12 \text{ kN}$
10	PP_Forjado	$23,00 \text{ kN} \times 19 = 437,00 \text{ kN}$
11	PP_Fachada	$36,48 \text{ kN} \times 19 = 693,12 \text{ kN}$
20	Carga Permanente	$13,48 \text{ kN} \times 19 = 256,12 \text{ kN}$
30	Sobrecarga de Uso	$12,96 \text{ kN} \times 19 = 246,24 \text{ kN}$

Tabla 6.3. Cargas totales de las hipótesis simples del módulo. Fuente: Software Robot Structural Analysis

Por alguna razón, para las demás cargas, la repartición que hace el programa no es tan proporcional. Por eso, la carga permanente, que en principio tendría que dar un valor igual a la sobrecarga de uso, es algo mayor que ésta.

Definición del forjado

Se opta por la utilización de un forjado de chapa de acero colaborante para el módulo dado su buen funcionamiento con estructura metálica. Se define, en función del estado de cargas ya descrito, para una luz máxima de 3,60 metros bi-apoyado. Se escoge el forjado Haircol 59 FC. A continuación, se presenta la Figura 6.2, donde se representa la selección del forjado

colaborante adecuado.

Espesor 1,20 mm

Sobrecarga máxima admisible (daN/m²)

Luz (m)	h (cm)															
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2,20	1164	1294	1424	1555	1687	1819	1951	2084	2217	2350	2483	2617	2751	2886	3020	3155
2,40	980	1089	1199	1310	1421	1532	1643	1755	1867	1979	2092	2174	2258	2343	2427	2512
2,60	836	930	1024	1118	1213	1308	1403	1498	1592	1687	1782	1877	1972	2067	2162	2257
2,80	723	804	885	966	1047	1128	1209	1290	1371	1452	1533	1614	1695	1776	1857	1938
3,00	631	701	771	841	911	981	1051	1121	1191	1261	1331	1401	1471	1541	1611	1681
3,20	544	604	664	724	784	844	904	964	1024	1084	1144	1204	1264	1324	1384	1444
3,40	464	514	564	614	664	714	764	814	864	914	964	1014	1064	1114	1164	1214
3,60	394	434	474	514	554	594	634	674	714	754	794	834	874	914	954	994
3,80	334	364	394	424	454	484	514	544	574	604	634	664	694	724	754	784
4,00	284	304	324	344	364	384	404	424	444	464	484	504	524	544	564	584

Figura 6.2. Tabla de forjados de chapa colaborante de acero Haircol 59 FC. Fuente: (Europerfil 2014).

En función de la carga y la luz se escoge un forjado colaborante de chapa $e = 1,20\text{mm}$ y $h = 18\text{ cm}$. Por consiguiente, el valor de carga máxima admisible es de $4,01\text{ kN/m}^2$, lo cual cumple con los 4 kN/m^2 de carga permanente y uso que tiene que poder soportar.

Se apoyará en el alma del perfil lateral. Se fijará el 1 de cada 2 senos de la chapa al perfil con tirafondos autoroscantes para asegurar su fijación, tal como se representa en la Figura 6.3.

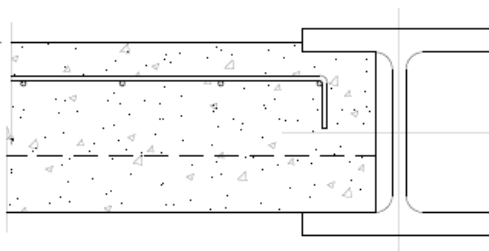


Figura 6.3. Detalle de apoyo del forjado colaborante con el perfil perimetral HEM. Fuente: (Europerfil 2014).

El techo de cada módulo se realiza con un falso techo registrable de yeso laminado para albergar las instalaciones puesto que tendrá el forjado colaborante del siguiente módulo encima. En el caso de los módulos de la última planta, se realizarán con un techo conformado por el mismo forjado colaborante y la composición de una cubierta transitable como remate del edificio.

Modelo de cálculo

Se realiza un modelo en Robot Structural Analysis basado en el cálculo por elementos finitos. Se definen los elementos pilares y vigas para su dimensionado y los forjados para la correcta distribución de las cargas, Figura 6.1.

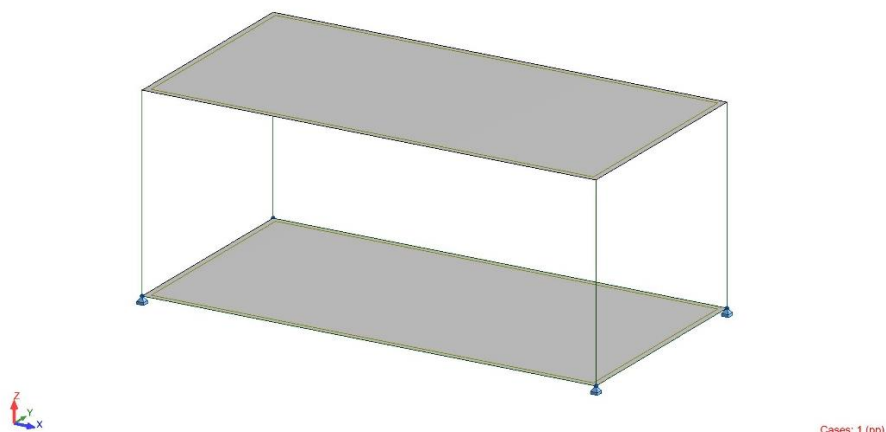


Figura 6.4. Modelo 3D de cálculo. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

Deformaciones

Se comprueba la flecha que presentan los elementos estructurales horizontales, véase las vigas perimetrales del módulo de la Figura 6.5.

Se observa una diferencia importante entre la superior y la inferior. Esto se debe a que la parte inferior soporta todo el peso del uso y permanentes de la planta, mientras que la superior solo sustenta el paso de instalaciones de manera eventual.

Se ha limitado la flecha a 1cm por confort visual. Tratándose de una luz de 7,20 m se puede confirmar que la flecha cumple con la normativa siendo de $L/720$ (CTE-DB-SE 2009).

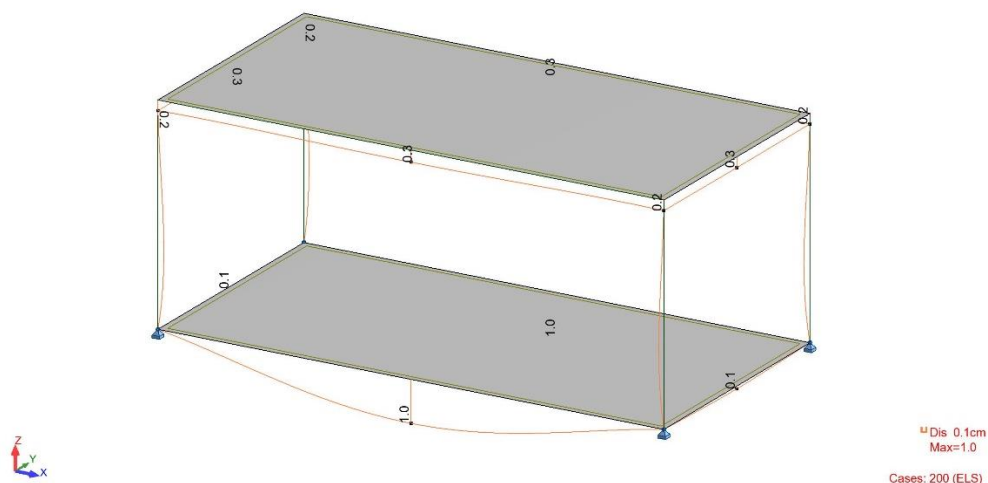


Figura 6.5. Deformación en Estado Límite de Servicio. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

Estado tensional

Las siguientes figuras; Figura 6.6, Figura 6.7, Figura 6.8, son las representaciones del axil, cortante y momento flector, respectivamente actuantes en el módulo.

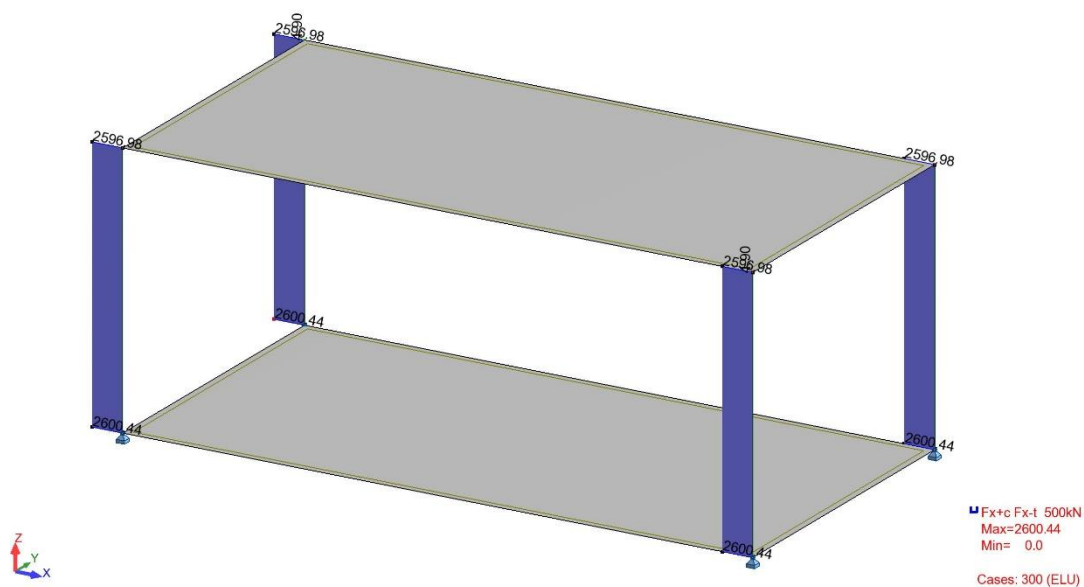


Figura 6.6. Diagrama del estado tensional del módulo – Axil. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

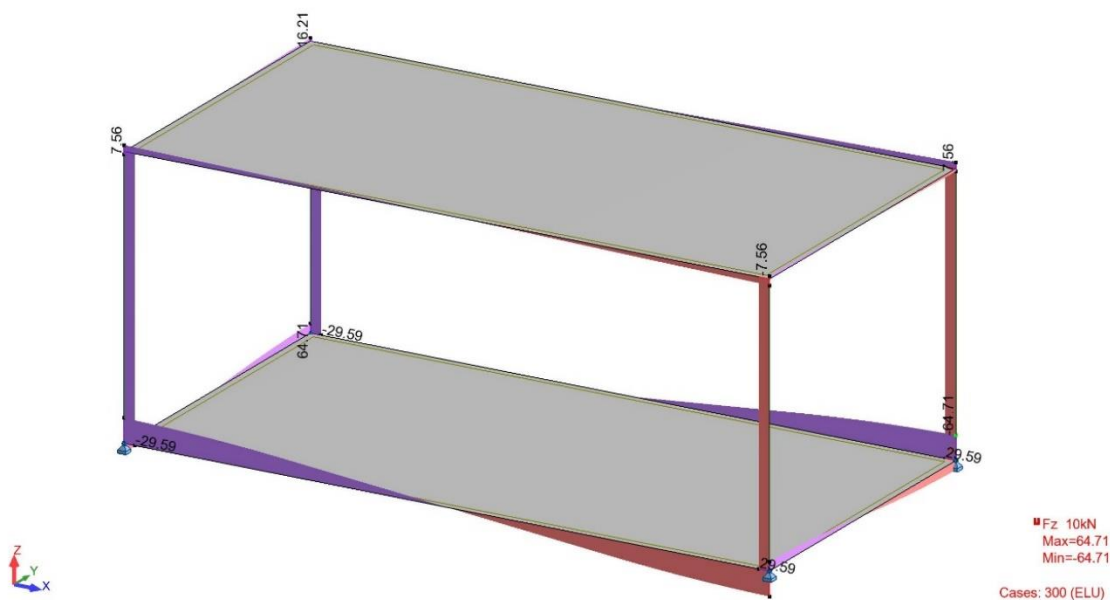


Figura 6.7. Diagrama del estado tensional del módulo – Cortante en eje z. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

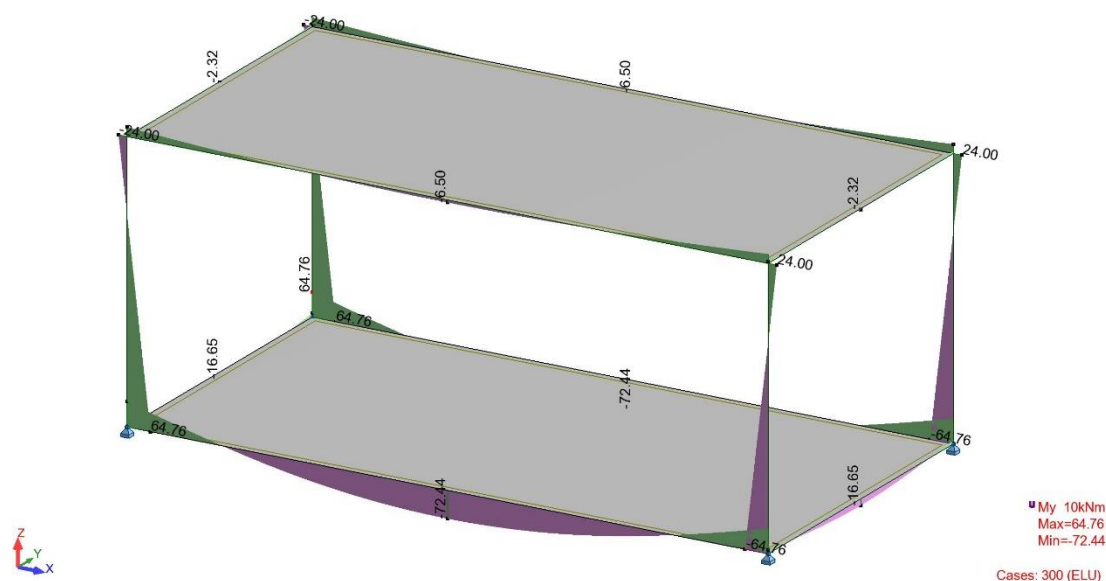


Figura 6.8. Diagrama del Momento Flector en eje y del módulo. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

Las reacciones representadas gráficamente en las tres figuras anteriores (Figura 6.6, Figura 6.7, Figura 6.8), además, quedan recogidas en la Tabla 6.4 resumen del estado tensional.

Perfiles	Axil N (kN)	Cortante V_z (kN)	Momento flector M_y (kNm)
Pilar	2600,44	29,59	64,76
Viga	29,59	16,21	72,44

Tabla 6.4. Resumen del estado tensional del módulo por componente. Fuentes: Elaboración propia

Se definen los perfiles del módulo de la siguiente manera:

- Pilares SHS 200x200x15mm acero S355
- Vigas HEM 200 acero S355

Como se puede comprobar, los perfiles finales obtenidos no corresponden a los propuestos inicialmente para el predimensionado. Aunque la modelización se realizó de acuerdo a un edificio de 20 plantas, las secciones resultantes son mayores que las expuestas en (Lawson et al. 2012) (edificio de 25 plantas). En caso de la viga, se tuvo que cambiar de tipo de sección ya que, de lo contrario, no se cumplía la exigencia de un mínimo de altura libre de 2,5 m dentro de la vivienda (si se utilizase la sección C como viga).

Por consiguiente, la Figura 6.9 muestra el módulo resultante con los perfiles dimensionados.

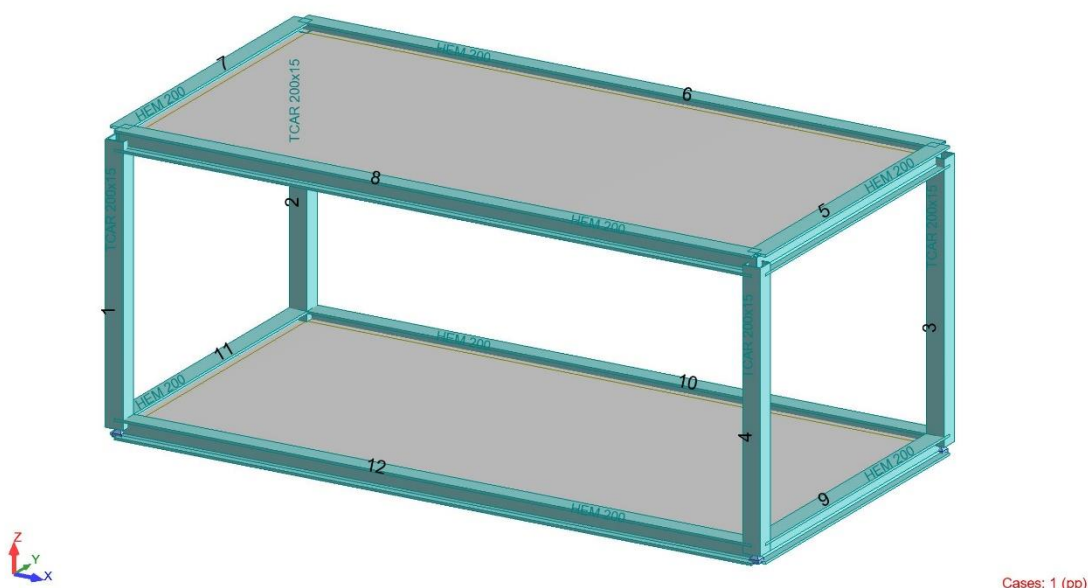


Figura 6.9. Definición de la sección de los perfiles. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

En los Anexos I Estructura, Comprobación tensional de los perfiles del módulo, se pueden ver los informes proporcionados por el programa informático. En ellos se proporcionan, las capacidades y los esfuerzos de los perfiles, cálculos de pandeo y verificaciones de desplazamiento.

Capacidad autoportante de los módulos

Se elabora un estudio de la capacidad de los módulos sin la necesidad de un núcleo rígido. Dicho estudio se resume en la tabla de más abajo, Tabla 6.5. Configuraciones permitidas según la capacidad autoportante del módulo. Fuente: Elaboración propia.

Se puede concluir que el caso de 1 solo módulo por planta solo es capaz de asumir un máximo de 2 plantas mientras que las configuraciones de 2, 3 y 4 módulos por planta son estables 4 plantas debido a que, por su configuración, el plano paralelo más desfavorable es idéntico entre ellas. Además, se puede observar una relación entre el tamaño de la estructura y las cargas laterales, es decir cuanto más grande es la estructura, mayor es la acción del viento y la sollicitación más alta. Por último, la configuración de 6 módulos por planta es capaz de mantener la estabilidad global hasta 5 plantas.

A partir de aquí se considera un incremento en planta demasiado grande para compensar las necesidades en altura y se recomienda utilizar una configuración con núcleo rígido.

	2 plantas	3 plantas	4 plantas	5 plantas	6 plantas
1 módulo		166%			
2 módulos				106 %	
3 módulos				116 %	
4 módulos				126 %	
6 módulos					111 %

Nota:
 En verde, configuraciones que dan deformaciones asumibles.
 En rojo, configuraciones con deformaciones no asumibles. El porcentaje en estas las celdas representa el tanto por cien obtenidos respecto la deformación permitida por el CTE.
 Las figuras representan las posibles configuraciones de las plantas.

Tabla 6.5. Configuraciones permitidas según la capacidad autoportante del módulo. Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Apilamiento vertical de módulos

El comportamiento estructural de un conjunto de módulos es complejo debido a la influencia de las tolerancias implícitas en el procedimiento de instalación, las múltiples interconexiones entre los módulos y la forma en que las fuerzas se transfieren a los elementos estabilizadores, como los arriostramientos o el núcleo. Los factores clave a tener en cuenta en el diseño de edificios modulares de gran altura, de acuerdo a (Rahman and Rahman Sobuz 2018)(Lawson and Richards 2010), son:

- La influencia de las excentricidades iniciales y las tolerancias de construcción en las fuerzas y momentos adicionales en las paredes de los módulos.
- Aplicación de la norma de diseño para acero a la tecnología modular.
- Efectos de segundo orden debido a la estabilidad del grupo de módulos, especialmente en el diseño de los pilares de las esquinas.

- Mecanismo de transferencia de fuerza de cargas horizontales al sistema estabilizador (núcleo).
- Robustez ante acciones accidentales (también conocidas como integridad estructural) para sistemas modulares.

Influencia de las tolerancias de construcción

Para una pila vertical de módulos, el error acumulativo de posición, e , debido al proceso de instalación, puede corregirse parcialmente. Usando la misma lógica que en BS EN 1090-2, la tolerancia acumulativa de posición (en milímetros) puede tomarse estadísticamente como $e \leq 12 \sqrt{n}$, donde n es el número de módulos en un grupo vertical, pero esto no tiene en cuenta las tolerancias geométricas debidas a la fabricación del módulo.

A este error de posicionamiento se le agrega la posibilidad de un error sistemático de fabricación en la geometría de los módulos. Para un solo módulo, la tolerancia máxima permitida puede tomarse como $h/500$ (tanto en tolerancias de longitud como ancho, además de la desviación vertical). Sin embargo, en un gran número de módulos, el error promedio en la fabricación puede tomarse como la mitad de la tolerancia permitida para un solo módulo. Por lo tanto, la falta de verticalidad de los pilares de las esquinas puede tomarse como $h/1000$, donde h es la altura del módulo (generalmente 3 m).

Para tener en cuenta las tolerancias de fabricación, la desviación vertical acumulada sobre la altura del edificio puede tomarse como $nh/1000$, o aproximadamente $3n$ mm. La desviación vertical total permitida δ_h (véase la Ecuación 6.1) sobre la altura del edificio, que consiste en un apilamiento de n módulos, es por lo tanto una combinación de tolerancias posicionales y geométricas, que se expresa la siguiente manera.

$$\delta_h \leq e + nh/1000 = 5n + 3n = 8n \text{ mm}$$

Ecuación 6.1

Se recomienda que la falta de verticalidad absoluta en la construcción modular se limite a un máximo de 80 mm en relación con una posición de referencia, que controlará los edificios de diez o más plantas. Esto se puede lograr con un buen control de la instalación.

Los ajustes en la posición del módulo deben hacerse gradualmente en lugar de únicamente en algunas posiciones, lo que de otra manera se añadiría a las excentricidades locales. Estos ajustes se pueden hacer variando el espacio de la cavidad entre los módulos. Al detallar, el ancho de la cavidad debe ser al menos igual a la mitad de la tolerancia máxima esperada, o como una simple regla, tomada como mínimo de 40 mm.

En el BS EN 1993-1-1 Eurocódigo 3 se permite una desviación vertical de $L/200$ para una sola columna, pero esto se reduce en un factor de $2/3$ cuando se considera el promedio sobre una serie de plantas (es decir, $\delta_h < L/300$). La desviación vertical permitida de una estructura completa se obtiene multiplicando este valor para una sola columna por un factor de $\{[0,5 \cdot [1 + (1/m)]]\}^{0,5}$ para m columnas en un grupo horizontal. El resultado tiende a $\delta_h < L/420$.

La excentricidad combinada en un conjunto vertical de módulos tiene en cuenta los efectos de las excentricidades de un módulo colocado encima del otro, y la reducción de las fuerzas de compresión que actúan con la excentricidad aumentada con la altura. Las fuerzas horizontales equivalentes requeridas para el equilibrio del sistema se transfieren como fuerzas de corte. Por lo tanto, se crea un momento adicional M_{add} que actúa sobre el módulo base y viene dado por una excentricidad efectiva Δ_{eff} multiplicada por la fuerza de compresión P en el módulo de la primera planta, de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 6.2} \quad M_{add} = P \cdot \Delta_{eff}$$

$$\text{Ecuación 6.3} \quad \Delta_{eff} = \left[\frac{n-1}{6} \right] 8n$$

$$\text{Ecuación 6.4} \quad k = \left[\frac{8(n-1)}{3h} \right] \text{ ó } \left[\frac{n-1}{3n} \right] \left[\frac{80}{h} \right] \text{ para } n > 10$$

Dónde k es la proporción de carga factorizada que actúa en cada planta. Es el porcentaje de de la carga vertical P aplicada al módulo. Para las construcciones modulares se recomienda que este valor no supere el 1% de la carga vertical factorizada que actúa en cada módulo. Como se puede observar, k es puramente función de la altura del módulo y el edificio. (Lawson and Richards 2010).

A continuación, se presenta la siguiente tabla, Tabla 6.6. Excentricidad efectiva y carga horizontal factorizada en construcción modular en función de la altura y el número de plantas del edificio. Fuente. Elaboración propia a partir de (Lawson and Richards 2010). Esta tabla, se elabora a partir de las formulas, condiciones y expresiones anteriores.

Se puede observar, por consiguiente, que la proporción de carga horizontal factorizada, que es exclusivamente geometrica y no depende de ningún valor de carga aplicada, no supera el 1%. Es más, ésta se estanca en el 0,84%. Si el número de plantas fuese mayor de 20, la k apenas superaría el 0,85%.

n	Altura edificio (m)	Desviación acumulativa de la verticalidad (mm)	Δ_{eff} (mm)	k (%)
2	6	16	3	0,44
4	12	32	16	0,67
6	18	48	40	0,74
8	24	64	75	0,78
10	30	80	120	0,80
12	36	80	147	0,81
14	42	80	173	0,83
16	48	80	200	0,83
18	54	80	227	0,84
20	60	80	253	0,84

Donde:

n: Número de plantas del edificio.

Δ_{eff} : Excentricidad efectiva.

k: Proporción de carga horizontal factorizada.

Tabla 6.6. Excentricidad efectiva y carga horizontal factorizada en construcción modular en función de la altura y el número de plantas del edificio. Fuente: Elaboración propia a partir de (Lawson and Richards 2010).

Estabilidad de los pilares del módulo

Se prosigue con el cálculo de verificación de la estabilidad de los pilares del módulo. La notación y metodología seguidas de acuerdo al artículo “Modular design for high-rise buildings” (Lawson and Richards 2010).

En las dos siguientes tablas, Tabla 6.7 (donde se define la carga resultante superficial total aplicada al módulo y Tabla 6.8, (procedimiento del cálculo y comprobación de la estabilidad del módulo), ambas tablas son de elaboración propia.

Cargas	Valor	Unidades	Definiciones
Peso forjado	3,67	kN/m ²	Valores de carga definidas en el apartado 6.1.1. Carga de cálculo resultante total, sin mayorar.
Carga permanente	2	kN/m ²	
Sobrecarga de Uso	2	kN/m ²	
Total	7,67	kN/m ²	

Tabla 6.7. Definición de la carga resultante superficial total. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba cómo, efectivamente, la comprobación mediante la combinación lineal del axil y el momento flector para determinar la estabilidad verifica el pilar del módulo diseñado. Lo que demuestra que es viable un diseño de edificio modular de 20 plantas.

Expresiones	Valor	Unidades	Definiciones
$P_{crit} = N_{b,Rd} =$	3619,51	kN	Resistencia de pandeo crítica del pilar del módulo. Véase Anexos I Estructura. Comprobación tensional de los perfiles del módulo.
$P_c = N_{c,Rd} =$	3940,5	kN	Resistencia a compresión del pilar del módulo. Véase Anexos I Estructura. Comprobación tensional de los perfiles del módulo.
$w =$	7,67	kN/m ²	Carga superficial total sobre el suelo del módulo
$n =$	20	--	Nº de plantas del edificio
$\delta_o = 18 + 75/n =$	21,75	mm	Desviación de la verticalidad inicial del pilar
$a =$	7,2	m	Longitud del módulo
$b =$	3,6	m	Ancho del módulo
$P = (n - 1) \cdot \frac{w \cdot a \cdot b}{4} =$	944,33	kN	Fuerza de compresión resultante que actúa sobre un pilar del módulo
$\delta = \frac{\delta_o}{1 - (2 \cdot P/P_{crit})} =$	45,48	mm	Desviación de la verticalidad. La desviación vertical inicial del pilar de la esquina aumenta bajo una carga axial, P , en cada pilar, que puede ser aproximada por la teoría del pandeo del puntal
$M = P \cdot \delta =$	42,95	kNm	Momento flector asociado a la desviación de la verticalidad sobre el pilar
$M_c = M_{el} =$	273,97	kNm	Resistencia elástica a flexión. Véase Anexos I Estructura. Comprobación tensional de los perfiles del módulo.
$\frac{P}{P_c} =$	0,240	--	--
$\frac{M}{M_{el}} =$	0,157	--	--
$\frac{P}{P_c} + \frac{M}{M_{el}} =$	0,396	--	Combinación lineal del axil y el momento flector para determinar la estabilidad
Comprobación			
$\frac{P}{P_c} + \frac{M}{M_{el}} < 1$	OK		

Tabla 6.8. Cálculo y comprobaciones de la estabilidad de los pilares del módulo. Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. Diseño de las uniones

El diseño de las conexiones entre módulos tiene como objetivo una instalación rápida y fácil, pero capaz de proporcionar suficiente rigidez y resistencia. Las uniones realizadas entre el pilar y la viga son mediante soldadura. Dado que se ha de garantizar la rigidez y robustez estructural del módulo, la soldadura será en todo el perímetro de la sección de la viga. Por tanto, siguiendo las reglas de buena práctica y realizando las uniones a tope con penetración completa, éstas no necesitan ser calculadas y han de realizarse en fábrica.

Muchos investigadores han propuesto diferentes tipos de uniones para la construcción modular, por ejemplo, para las conexiones viga – viga y para las conexiones columna – columna utilizando pernos y placas, véase la Figura 6.10 Uniones atornilladas interiores

El diseño de una unión en sí mismo es complejo, más aún si se trata de diseñar o calcular una unión para el acoplamiento en los edificios modulares de gran altura. Para una conexión entre módulos, la soldadura no resulta una buena opción, ya que requiere mano de obra altamente calificada para trabajar en un espacio limitado y, a menudo, está sujeta a una inspección prolongada a posteriori. Por lo tanto, se ha decantado por diseñar una unión atornillada con placa de refuerzo, como se muestra en la Figura 6.10. Estudios anteriores muestran que estas conexiones pueden diseñarse para ser dúctiles y lo suficientemente fuertes como para resistir cargas sísmicas en sistemas modulares de acero (Liew, Dai, and Chua 2018). Así pues, se van a llevar acabo los cálculos pertinentes de diseño de las uniones atornilladas. Como se verá más adelante, este tipo de solución no es el más adecuado, pero suficiente como una solución inmediata.

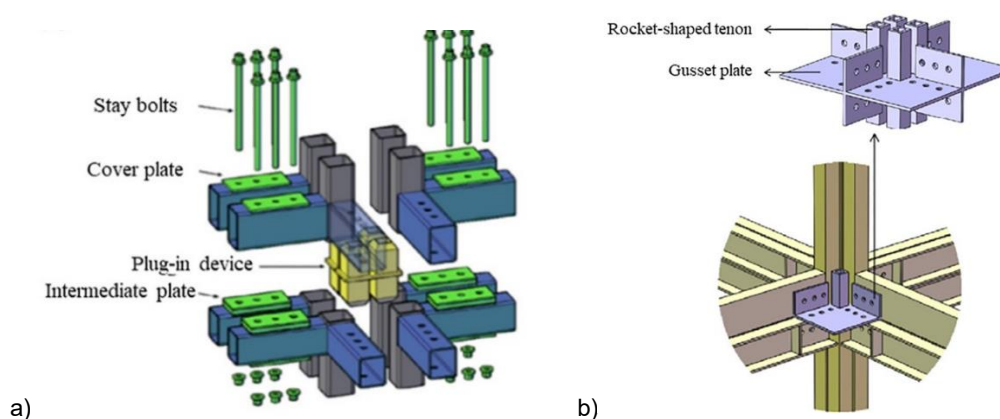


Figura 6.10. Uniones atornilladas interiores a) y b). Fuente: (Liew et al. 2018).

Uniones atornilladas entre módulos

Mientras que la unión entre distintos módulos o al núcleo mismo se realizará mediante el atornillado con pletinas de refuerzo. Las cargas seleccionadas para el diseño de la unión son presentadas en la Tabla 6.10 y son las siguientes:

Carga	Valor	Unidades	Definiciones
T_{Ed}	175	kN	La tracción máxima de toda la estructura es de 173,44 kN, que se da en el núcleo. Por consiguiente, se dimensionará la unión atornillada tal que aguante, al menos, 175 kN. Véase el diagrama del estado tensional de la estructura – axil, Figura 6.22, del apartado 6.2.2.
	175000	N	
V_{Ed}	85	kN	La cortante máxima de toda la estructura es de 80,39 kN, que da en el núcleo. Por consiguiente, se dimensionará la unión atornillada tal que aguante, al menos, 85 kN Véase el diagrama del estado tensional de la estructura – cortante, Figura 6.23 del apartado 6.2.2.
	85000	N	

Tabla 6.9. Cargas de diseño de las uniones atornilladas. Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se exponen las siguientes tablas; Tabla 6.10 (comprobaciones a realizar según tipo de fuerza aplicada en el diseño), Tabla 6.11 (características y dimensiones de los perfiles y el acero del módulo diseñado), Tabla 6.12 (característica y dimensiones de la pletina de refuerzo diseñada para la unión atornillada) y Tabla 6.13 (características y dimensiones del tornillo diseñado).

En el apartado de Anexos I Estructura, Cálculo de uniones atornilladas, se describe en detalle el procedimiento seguido y se muestran los cálculos realizados para el dimensionado de la pletina y los tornillos. La notación y metodología seguidas de acuerdo al capítulo 8.5 del (CTE-DB-SE-A 2008).

Fuerza	Comprobaciones	
Cortante	Resistencia a cortante	$F_{v.Ed} < F_{v.Rd}$
	Resistencia al aplastamiento	$F_{v.Ed} < F_{b.Rd}$
Tracción	Resistencia a tracción	$F_{t.Ed} < F_{t.Rd}$
	Resistencia a punzonamiento	$F_{t.Ed} < F_{p.Rd}$

Tabla 6.10. Comprobaciones para realizar según tipo de fuerza aplicada en el diseño de las uniones atornilladas.

Característica	Pilar	Viga
Tipo	SHS200	HEM200
Acero	S355	S355
f_y (N/mm²)	355	355
f_u (N/mm²)	470	470
t_{alma} (mm)	15	15
t_{ala} (mm)	15	25

Tabla 6.11. Características de los perfiles de los módulos, para el diseño de la unión atornillada. Fuente. Elaboración propia.

Pletina de refuerzo	Acero	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	t_p (mm)	$N_r \times N_t$	e (mm)	p (mm)	B (mm)	L (mm)
	S355	355	470	10	1 x 3	35	60	70	250

Donde:

N_r : N° de filas de tornillos por pletina.

N_t : N° de tornillos por fila.

e : Separación del eje del tornillo al borde de la pletina, [26 – 80] mm.

p : Separación entre los ejes de los tornillos, [51-140] mm.

B : Ancho pletina de unión de 2 módulos contiguos.

L : Longitud pletina de unión de 2 módulos contiguos.

Tabla 6.12. Características de la pletina de refuerzo diseñada para la unión atornillada. Fuente. Elaboración propia.

Tornillo sin pretensar	Clase	f_y (N/mm ²)	f_{ub} (N/mm ²)	Φ_t (mm)	A_s (mm ²)	d_m (mm)
	6.8	480	600	16	157	24

Donde:

Φ_t : diámetro del tornillo.

A_s : Área resistente del tornillo.

d_m : Medida entre caras de la cabeza.

Tabla 6.13. Características de los tornillos diseñados para la unión atornillada. Fuente: Elaboración propia.

Aunque la resistencia a cortante de la unión permita la colocación de 1 solo tornillo de clase 6.8, éste no es suficiente para los esfuerzos de tracción a los que pueden estar sometidas las uniones. Por consiguiente, se han de colocar 3 tornillos de clase 6.8. Finalmente queda definida tanto la pletina de refuerzo como los tornillos que se tienen que utilizar.

En la siguiente tabla, Tabla 6.14, se resumen tanto las conexiones en el apilamiento de los módulos como la unión interna del módulo y el tipo de unión utilizada en cada caso.

Elementos unidos	Tipo de unión
Pilar – Viga módulo	Soldadura a tope
Módulo - Módulo	Atornillada con pletina de refuerzo
Módulo - Núcleo	Atornillada con pletina de refuerzo
Pilar módulo - Cimientos	Basa de soporte

Tabla 6.14. Características de los tornillos diseñados para la unión atornillada.

Unión a la cimentación

La comprobación de la unión de un elemento metálico a otro de hormigón, como son las basas de soportes (véase la Figura 4.4), requiere verificar la existencia de resistencia suficiente frente a los esfuerzos transmitidos en la región de contacto, considerando, tanto la resistencia del hormigón de dicha región, como la de los elementos metálicos que materializan el contacto. En las siguientes tablas; Tabla 6.15 (cargas de diseño para la unión a la cimentación del módulo), Tabla 6.16 (características y dimensiones del anclaje mediante barras corrugadas utilizadas) y por último Tabla 6.17 (característica y dimensiones de la placa de asiento).

En el apartado de Anexos I Estructura, Cálculo de basa de soporte, se describe en detalle el procedimiento seguido y se muestran los cálculos realizados para el dimensionado de la placa de asiento y el anclaje utilizado. La notación y metodología seguidas de acuerdo al capítulo 8.8 del (CTE-DB-SE-A 2008).

Carga	Valor	Unidades	Definiciones
N_{Ed}	4100	kN	La reacción en las uniones de los pilares con la cimentación máxima es de 4017,28 kN. Por consiguiente, se dimensionará para 4100 kN. Véase el diagrama del estado tensional de la estructura – axil, Figura 6.22, del apartado 6.2.2.
V_{Ed}	85	kN	La cortante máxima de toda la estructura es de 80,39 kN, que da en el núcleo. Por consiguiente, se dimensionará la unión atornillada tal que aguante, al menos, 85 kN. Véase el diagrama del estado tensional de la estructura – cortante, Figura 6.23, del apartado 6.2.2.
M_{Ed}	0	kNm	Condición de articulación en la unión pilar – basa de soporte. Por consiguiente, los momentos son 0. Véase el diagrama del estado tensional de la estructura –Momento flector, Figura 6.24, del apartado 6.2.2.

Tabla 6.15. Cargas de diseño en la unión a la cimentación de la basa de soporte. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

Anclaje mediante barras corrugadas	Tipo	f_{yb} (N/mm ²)	f_{ub} (N/mm ²)	Φ_a (mm)	A_s (mm ²)	L_{bl} (cm)	L_{bII} (cm)
	B 500 S	500	550	16	201	40	58

Donde:

Φ_a : Diámetro del anclaje.

A_s : Área resistente del anclaje.

L_{bl} : Longitud de anclaje para barras corrugadas aisladas en posición I (buena adherencia).

L_{bII} : Longitud de anclaje para barras corrugadas aisladas en posición II (adherencia deficiente).

Tabla 6.16. Características del anclaje diseñado en la unión a la cimentación. Fuente. Elaboración propia

Placa de asiento	Acero	f_{yk} (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	t_p (mm)	c (mm)	l_{ef} (mm)	b_{ef} (mm)	a (mm)	b (mm)	A_{ef} (mm ²)
	S355	355	470	10	13,99	428	228	600	400	97565

Donde:

t_p : Espesor de la basa.

c : Distancia máxima entre los segmentos paralelos a las caras de los perfiles que forman la sección de arranque del soporte.

l_{ef} , b_{ef} : Longitud y el ancho de la superficie eficaz.

a , b : Dimensiones de la placa de asiento.

A_{ef} : Área eficaz de contacto definida por la superficie comprimida (región de contacto en compresión).

Tabla 6.17. Características de la placa de asiento diseñado para la unión a la cimentación. Fuente: elaboración propia.

Problemática de las uniones atornilladas y soluciones propuestas

Una gran cantidad de tornillos generalmente lleva a demoras en el atornillado in-situ. Además, para realizar dichas conexiones, son necesarios orificios de acceso en paredes, suelo o techos en cada esquina de los módulos. Esto causaría daños a los acabados internos y costosas modificaciones in-situ.

Las uniones atornilladas permiten una mayor tolerancia en las conexiones, que proporciona una instalación más fácil, sin embargo, esto no es deseable para la estabilidad lateral del edificio modular de gran altura. Además, las prácticas modernas requieren que los acabados de las paredes sean del 100% y, por lo tanto, no son deseables las aberturas para el acceso con pernos. Por consiguiente, la conexión atornillada puede no ser ideal para los sistemas modulares de acero.

Para resolver los problemas anteriores, se propone una nueva forma de técnica de unión de las columnas del módulo e inferior. Dichas conexiones se pueden hacer por fuera de los módulos. La Figura 6.11 (a) muestra la conexión columna – columna, donde se utilizan barras verticales para la conexión vertical, mientras se usa un *Shear key* y una placa de unión horizontal para conectar los módulos adyacentes horizontalmente. En esta conexión, la unión vertical entre el módulo superior e inferior se realiza mediante la varilla vertical para resistir las fuerzas de tracción, mientras que las columnas resisten la fuerza de compresión mediante cojinetes. La cortante entre las columnas superior e inferior se transfieren mediante el cojinete de *Shear key* a la placa base que está soldada en la parte inferior de la columna del módulo superior.

Por el contrario, para la unión horizontal entre módulos adyacentes, el *Shear key* y la placa de unión horizontal están diseñadas para transferir las fuerzas laterales al núcleo. Esta conexión propuesta es débil al proporcionar rigidez de rotación entre los módulos superior e inferior, ya que solo la barra vertical proporciona la continuidad vertical y, por lo tanto, se puede suponer que la rigidez rotacional es insignificante. Del mismo modo, para la conexión que se muestra en la Figura 6.11 (b), cuatro barras dentro de las columnas rectangulares de tubos rellenos de hormigón pretensado, ya que puede desarrollar una mayor rigidez rotacional para evitar que las columnas se abran bajo cargas laterales extremas, como la carga sísmica.

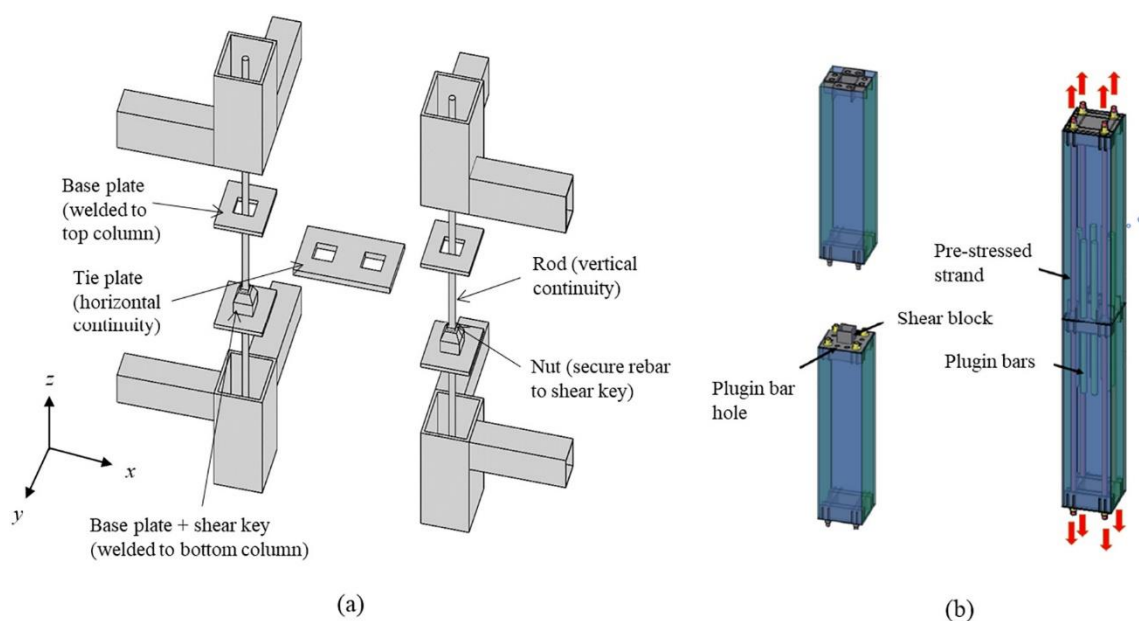


Figura 6.11. Conexiones columna – columna a) sistema de *Shear key* con barra vertical b) sistema de pretensado con barras. Fuente: (Liew et al. 2018).

6.1.4. Cerramientos

Una vez acabado el diseño de la estructura del módulo, toca ahora diseñar los cerramientos tal que el módulo a la vez cumpla las condiciones de habitabilidad y que sea ligero. Los cerramientos que se vayan a definir no tienen que aportar un peso adicional excesivo.

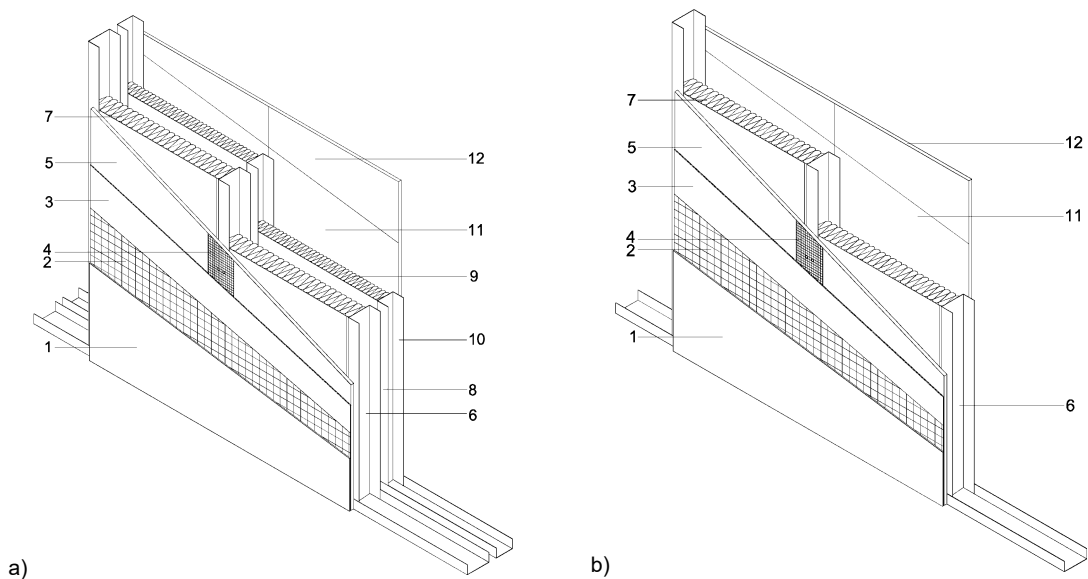
Cerramiento de fachada

Como cerramiento de fachada se ha escogido el sistema Fermacell Powerpanel H2O (representado en la Figura 6.12) de James Hardie, SLU. Este sistema dispone del DAU 14/082 (Documento de Adecuación al Uso) elaborado por ITeC (Instituto en Tecnologías de Construcción de Catalunya).

Dichos sistemas están formados por una o dos subestructuras de acero galvanizado (hoja simple u hoja doble de cerramiento) entre las que se coloca una capa de aislamiento, separadas por una cámara de aire no ventilada. Sobre la subestructura exterior se fija la placa de cemento fermacell Powerpanel H2O, se realiza el tratamiento de juntas y finalmente se aplica el revestimiento continuo. Los sistemas fermacell Powerpanel H2O se usan como cerramientos completos o integrales de fachada no ventilada con revestimiento exterior continuo. Además, no contribuyen a la resistencia de la estructura del edificio, sino que se sustentan sobre ella.

En los Anexos II Cerramientos, está disponible un desglose de las características de los

sistemas existentes, además de los paneles de exterior e interior utilizados. La variante escogida es **V1.1** de estructura doble y dos hojas (véase la Tabla 6.18).



Leyenda:

- 1 - Mortero de acabado Baumit

2 - Malla de fibra de vidrio Baumit

3 - Mortero base Baumit

4 - Tratamiento de juntas HD

5 - Placa de cemento **fermacell** Powerpanel H2O

6 - Subestructura exterior
- 7 - Aislamiento térmico exterior

8 - Cámara de aire no ventilada

9 - Aislamiento térmico interior

10 - Subestructura interior

11 - Barrera de vapor

12 - Panel fibra-yeso **fermacell**

Figura 6.12. Sistema Fermacell Powerpanel H2O; a) Sistema de doble hoja (Variante 1) y b) Sistema de hoja simple (Variante 2). Fuente: DAU 14/082, (ITeC 2019).

Variantes V1. Sistema fermacell Powerpanel H2O de dos hojas (doble subestructura)										
Núm.	Placa exterior (PH2O)	Subestructura Exterior (SExt)			Cámara aire (Air)	Subestructura Interior (SIInt)			Placa interior	Espesor total (mm)
		Ancho	Tipo de montante (*)	Mínimo espesor aislante (**)		Ancho	Tipo de montante	Mínimo espesor aislante (**)		
V1.1	12,5	100	C97-50-20	60	≥ 20	75	CW75/50	40	12,5	220

Nota:

- (*) La selección del montante depende de las acciones a las cuales esté sometida la subestructura metálica exterior.

(**) El espesor mínimo de aislante puede ser obtenido a partir de una sola placa de aislamiento o por la suma de dos placas de menor espesor.
- Las dimensiones de los componentes se dan en mm.

Tabla 6.18. Variantes del sistema fermacell Powerpanel H2O de dos hojas (doble subestructura). Fuente: Tabla 4.1 del DAU 14/082, (ITeC 2019).

Tabiquería

Como partición vertical de interior se ha escogido el sistema de tabiquería seca con placa de fibra-yeso Fermacell (representado en la Figura 6.13), también de James Hardie, SLU. Del mismo modo que el sistema de fachada integral, este sistema también dispone de un DAU (DAU 17/103) elaborado por ITeC.

El sistema se emplea como tabiquería no portante y trasdosada, en el interior de edificios de uso residencial y en edificios de otros usos. Este sistema está pensado para su ejecución sobre pavimento o directamente sobre forjado, siempre que las prestaciones de separación y estabilidad que ofrezca el tabique resultante respondan a las exigencias que apliquen a los tabiques del edificio. Dichas exigencias, en materia de comportamiento al fuego, seguridad de uso, aislamiento acústico y térmico dependerán del tipo y uso del edificio, así como de la distribución interior del mismo.

En los Anexos II Cerramientos, está disponible un desglose de las características de los sistemas existentes, además del panel utilizado. La variante escogida es **1S41** de estructura simple y panelado doble (véase la Tabla 6.19).



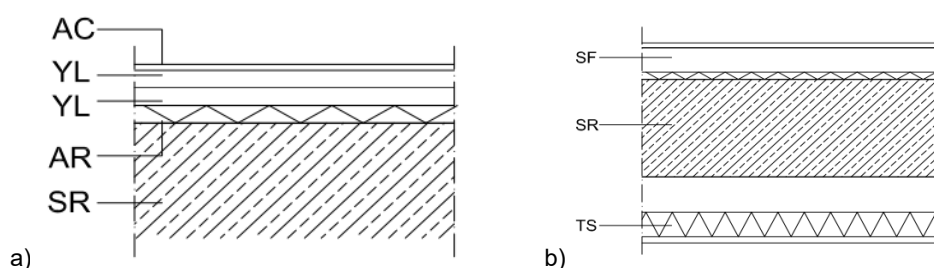
Figura 6.13. Sistema de tabiques con placas de fibra-yeso fermacell. Fuente: DAU 17/103, (ITeC 2018).

Sistemas de tabiquería – Subestructura Simple						
Denominación comercial	Panelado	Espesor placa (mm)	Canto del montante (mm)	Espesor total (mm)	Clasificación resistencia al fuego	Aislamiento acústico R_A (dBA)
1S41	Doble	12,5	50	100,0	EI 120	56,6
			75	125,0		$\geq 60,6$
			100	137,5		

Tabla 6.19. Configuraciones de tabiquería con subestructura simple consideradas en el DAU. Fuente: Tabla 4.1a del DAU 17/103, (ITeC 2018).

Partición interior horizontal

La partición interior del módulo se puede dividir en tres partes. Por un lado, se tiene el soporte resistente, que en este caso es el forjado de chapa de acero colaborante (Haircol 59), definido en el apartado 6.1.1. Debajo del forjado se encuentra un falso techo montado con montantes y travesaños, de igual forma que un tabique de interior, pero sin aislante, cubierto con placas de yeso laminado. Se aprovecha el hueco que deja la sección de la viga HEM200 para crear el falso techo, paso para las instalaciones. Por último, un suelo flotante hace de revestimiento del forjado (véase la Figura 6.14). Estas dos últimas soluciones quedan recogidas en el catálogo de elementos constructivos del CTE, (IETcc, EPCO n.d.). Mientras que en la Tabla 6.20 se recogen el espesor y las características térmicas de la partición horizontal interior.



Leyenda:

AC: Acabado.

PYL: Placa de yeso laminado.

AR: Aislamiento de Lana mineral.

SF: Suelo flotante

SR: Soporte resistente (forjado).

TS: Techo suspendido.

Figura 6.14. a) Sistema de suelo flotante S02 y b) Partición horizontal interior. Fuente: Catálogo de elementos constructivos de CTE. (IETcc, EPCO n.d.)

Partición horizontal interior / suelo	Espesor (mm)	Conductividad (W/mK)	Resistencia (m ² K/W)
Techo suspendido (falso techo)			
Placa de yeso laminado (PYL)	12,5	0,250	0,05
Cámara aire	195	--	0,1
Soporte resistente			
Forjado de chapa de acero colaborante	180	--	0,12
Suelo flotante			
Lana Mineral	20	0,037	0,54
2 capas de PYL	25	0,250	0,1
Acabado (tablero OSB / parqué)	1,8	0,130	0,014
Transmitancia suelos límite (W/m²K)			0,5

Tabla 6.20. Conductividad y resistencia de los elementos de la partición horizontal interior. Fuente: Elaboración propia.

Cubierta

Este cerramiento es exclusivo a los módulos de la última planta de la edificación, es decir, planta 20. La partición horizontal superior de los módulos que forman todas las demás plantas únicamente está compuesta por un techo suspendido. En la Figura 6.15, queda recogido el detalle de la cubierta, mientras en la Tabla 6.21, se recogen las características de densidad, espesor y térmicas de la cubierta plana convencional sin cámara de aire. Dicha cubierta, tal como se puede observar, presenta una transmitancia térmica total de 0.308, cumpliendo así con las exigencias del CTE HE.

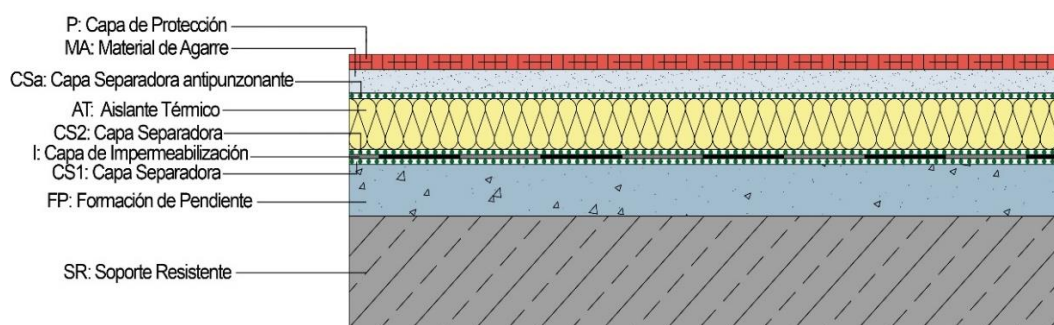


Figura 6.15. Cubierta plana caliente (sin cámara de aire) transitable convencional II. Fuente: (Hamkhiyan 2016).

Cubierta: Plana Convencional Transitable Caliente							
Elemento compositivo	Material	ρ [Kg/m ³]	δ [Kg/m ²]	e [cm]	λ [W/mK]	R_t [m ² K/W]	U [W/m ² K]
P: Capa de protección	Solado fijo	2000	40	2	1	0,02	50
MA: Material de nivelación	Mortero de cal	1900	19	1	1,3	0,00769	130
CSa: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
I: Lámina impermeabilizante	Lámina asfáltica bituminosa (LBM-50/G)	0,48	4,8	0,1	0,23	0,00434	230
CS: Capa separadora bajo protección	Fieltro de poliester	50	0,25	0,5	0,038	0,13157	7,6
AT: Aislante térmico	Espuma rígida de poliuretano (HFC)	70	4,9	7	0,024	2,9166	0,3428
B: Barrera contra vapor	Lámina de polietileno (HDPE)	980	0,49	0,05	0,5	0,001	1000
FP: Formación de pendientes	Hormigón en masa con grava normal con áridos ligeros	1800	72	4	1,15	0,03478	28,75
TOTAL			141,69	15,15		3,2476	0,3079

Tabla 6.21. Desglose y transmitancias de los elementos de la cubierta plana convencional sin cámara de aire II. Fuente: (Hamkhiyan 2016).

Balconera

Balconera de PVC no plastificado, colocada sobre premarco, con dos hojas correderas, para un hueco de obra aproximado de 210x220 cm, clasificación mínima 3 de permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación mínima 3A de estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación mínima C4 de resistencia al viento según UNE-EN 12210, con caja de persiana, guías y persiana de PVC. Vidrio laminar de espesor 4+4 con un butiral de 0.36 mm.

Puerta

Puerta para exterior de madera, de 35 mm de espesor, modelo catalán, maciza de 80 cm de anchura y de 210 cm de altura.

Tabla resumen de las transmitancias del módulo

Vistos todos los sistemas que conformarán los cerramientos de un módulo volumétrico genérico, se presenta la siguiente tabla resumen, Tabla 6.22, que a parte del sistema también engloba la superficie del cerramiento y su transmitancia. Es cierto que, una vivienda estará conformada por diferentes tipos de módulos, con diferentes distribuciones internas, pero los sistemas de cerramiento serán los mismos.

Cerramiento	Sistema	Superficie (m ²)	U (W/m ² K)	U*S (W/K)
Particiones verticales de interior		30,6	0,33	10,098
Tabique interior	Tabiquería seca con placa de fibra-yeso fermacell 1S41	9	--	--
Pared compartida con otro módulo		21,6	--	--
Cerramientos de fachada		36,9	0,46	16,974
Pared de balconera	Fermacell Powerpanel H20	6,18	--	--
Pared no compartida	V1.1 de doble hoja	21,6	--	--
Pared de la puerta		9,12	--	--
Cubierta	Falso techo PYL + Cubierta plana convencional	25,92	0,31	8,0352
Suelo	Forjado de chapa colaborante Haircol 59 + Suelo flotante	25,92	0,5	12,96
Balconera	PVC no plastificado	4,62	4,9	22,638
Puerta	Modelo catalán de exterior	1,68	0,69	1,152

Tabla 6.22. Resumen de las transmitancias superficiales de un módulo tipo. Fuente: Elaboración propia.

Una vez establecidas la forma, la ubicación y la orientación, los ocupantes, etc. del edificio que se pretenda diseñar con estos módulos, esta tabla servirá para el proyectista a la hora de realizar los cálculos de pérdida de cargas térmicas. Por tanto, podrá calcular la demanda frigorífica y de calefacción de su vivienda.

La siguiente imagen, Figura 6.16, representa un módulo PPVC que bien podría ser una representación gráfica fidedigna del módulo diseñado en este proyecto.

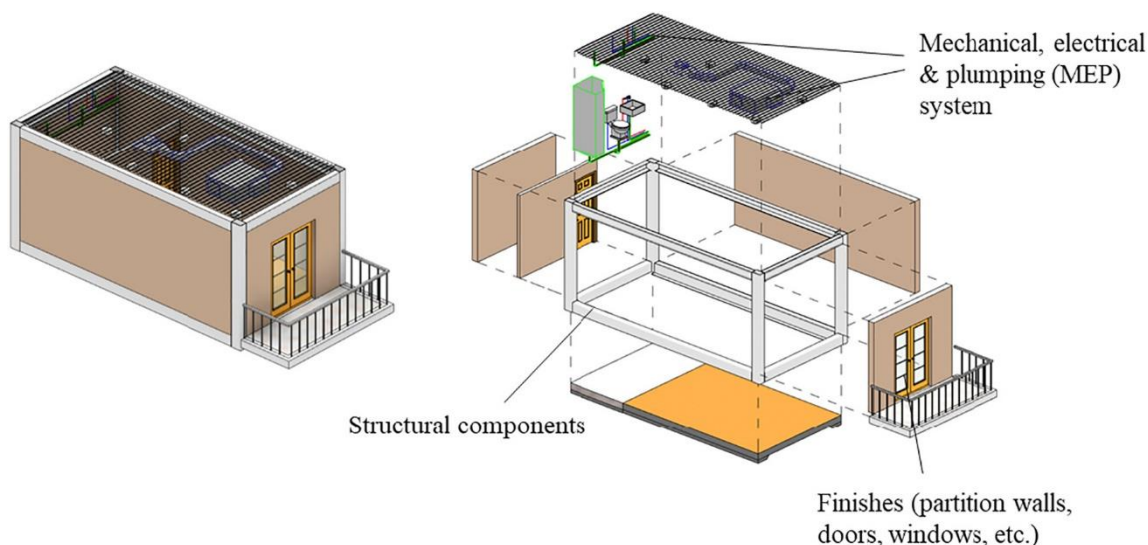


Figura 6.16. Ilustración del módulo volumétrico PPVC tipo acabado.

Resistencia al fuego

La resistencia al fuego (de un elemento estructural) se define como el tiempo durante el cual es capaz de mantener su función portante en situación de incendio. Se determina en minutos y se establecen clases: R30, R60, etc., donde los dígitos son los minutos en que el elemento resiste (mantiene la capacidad portante) la acción del fuego.

Tanto los sistemas de cerramientos (exterior e interior) verticales como horizontales, descritos anteriormente, revisten completamente toda la estructura metálica propia del módulo. Es decir, ni los pilares ni las vigas quedan a la vista. Esto conlleva a que, en caso de fuego o incendio, el módulo esté totalmente protegido de las llamas. Otra opción, además de la mencionada anteriormente, podría ser la aplicación de una pintura intumescente. Aun así, para poder determinar los minutos de la resistencia al fuego (R) de la estructura metálica del módulo se tiene que llevar una serie de ensayos de acuerdo con la UNE – EN 13381 - 4:2014 y UNE – EN 13381 - 8:2015 “Métodos de ensayo para determinar la contribución a la resistencia al fuego de elementos estructurales” parte 4 (Protección pasiva aplicada a elementos de acero) y parte 8 (Protección reactiva aplicada a los elementos de acero).

La clasificación a la resistencia al fuego (EI) de los sistemas constructivos y la clasificación de la reacción al fuego de los elementos que conforman los sistemas de fachada y tabiquería quedan recogidos en sus respectivos DAUs.

6.2. Diseño de la estructura del edificio de gran altura

6.2.1. Diseño geométrico de la planta

En este apartado se va a proceder con el diseño de la planta del edificio modular que se pretende diseñar, véase la Figura 6.17. Cada planta del edificio consistirá en total de 4 viviendas. Estas viviendas se dividen en 2 tipos; los de tipo 1 y tipo 2. Las viviendas tipo 1 consisten en 4 módulos ensamblados y los de tipo 2 consisten en 5 módulos ensamblados. Todos los módulos son de las mismas dimensiones, como ya se dijo anteriormente, cada módulo hace 7,2 x 3,6 x 3 m. Por tanto, las viviendas tipo 1 tendrán una superficie útil de 100,8 m², mientras que las de tipo 2, 126 m². Así pues, toda la planta del edificio hará 21,6 x 25,2 m.

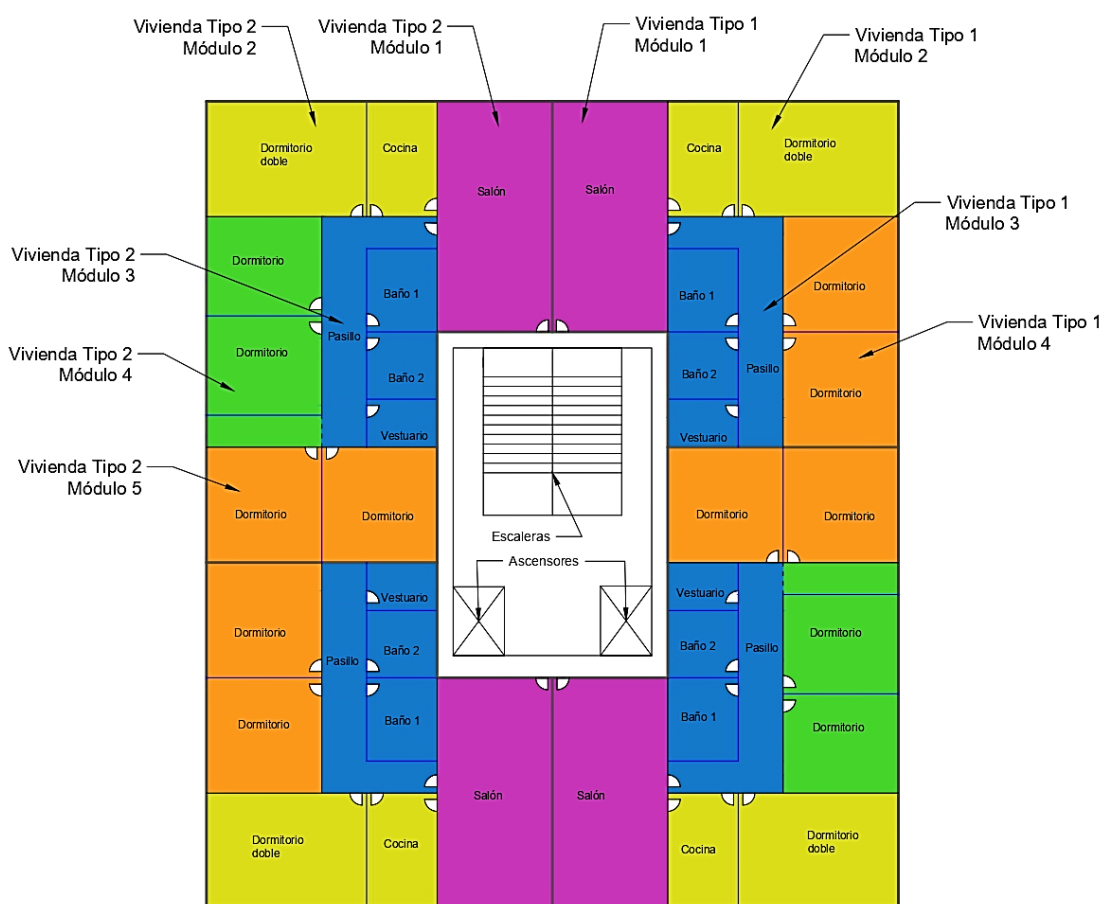


Figura 6.17. Partición de la planta del edificio modular según las diferentes secciones que forma cada módulo.
Fuente: elaboración propia.

6.2.2. Análisis y definición del núcleo resistente

Se procede a la realización de un modelo de cálculo del edificio completo para el dimensionado del núcleo principal, que proporcionara la estabilidad global del edificio.

Modelo de cálculo

Se realiza un modelo simplificado del total del edificio en el que se modelan los perfiles del núcleo central y los perfiles que conforman los módulos alrededor de éste.

Por temas de modelado se decide, en el caso de los módulos que ya han sido calculados de forma independiente, realizar una única barra que defina los 4 pilares concéntricos (o 2 en fachada) y el mismo sistema para las vigas paralelas de distintos módulos con tal de reducir el número de elementos en el programa y de esta manera conseguir un modelo con el que poder trabajar y mantenga fidelidad a la realidad.

Estado de cargas

Se presenta un modelo tridimensional de la estructura principal del edificio junto al núcleo central (véase la Figura 6.18) para definir la dimensión de los elementos que lo conforman. Se determinan una serie de hipótesis simples para definir el estado de cargas del módulo, recogidas en la Tabla 6.23.

	Hipótesis Simples	Carga
1	Peso Propio	El programa define el peso propio de la estructura utilizada.
10	PP_Forjado	Se establece el peso del forjado colaborante, Haircol 59 FC, (Europerfil 2014), 3,67 kN/m ² .
11	PP_Fachada	Carga lineal de la fachada. De una altura de h=3m, apoya la mitad en cada viga del módulo. 1,65 kN/ml. calculado a partir de la información proporcionada en el DAU 14/082.
20	Carga Permanente	Carga definida de acuerdo a (CTE-DB-SE-AE 2009), 2,00 kN/m ²
30	Sobrecarga de Uso	Carga definida de acuerdo a (CTE-DB-SE-AE 2009), 2,00 kN/m ² , (3 kN/m ² en cubierta)
40	Viento en eje X (Vx)	Se toma como referencia un viento medio según los parámetros de (CTE-DB-SE-AE 2009), 1,50 kN/m ² . 5,00 kN/ml por planta
50	Viento en eje Y (Vy)	Se toma como referencia un viento medio según los parámetros de (CTE-DB-SE-AE 2009), 1,50 kN/m ² . 5,00 kN/ml por planta.
60	Carga de Nieve	Se coge un valor medio de nieve en España de (CTE-DB-SE-AE 2009), 0,50 kN/m ² .

Tabla 6.23. Hipótesis de estado de cargas del edificio modular. Fuente: Elaboración propia.

Se establecen las cargas gravitacionales para la definición de los elementos estructurales. En este caso, al comprobar la estabilidad global de la edificación se añaden las cargas debidas al viento. A continuación las combinaciones de hipótesis simples, de acuerdo a (CTE-DB-SE 2009), expresados en la Tabla 6.24.:

Combinación de hipótesis	Nombre	Definición
200	ELS	$(1+10+11+20+30+60)*1,00$
240	ELS_Vx	$(1+10+11+20+30+40+60)*1,00$
250	ELS_Vy	$(1+10+11+20+30+50+60)*1,00$
300	ELU	$(1+10+11+20)*1,35+(30+60)*1,50$
340	ELU_Vx	$(1+10+11+20)*1,35+(30+40+60)*1,50$
350	ELU_Vy	$(1+10+11+20)*1,35+(30+50+60)*1,50$

Tabla 6.24. Combinación de las cargas en los Estado Límite de Servicio y Uso para el edificio modular.
Fuente: Elaboración propia.

Modelo de cálculo

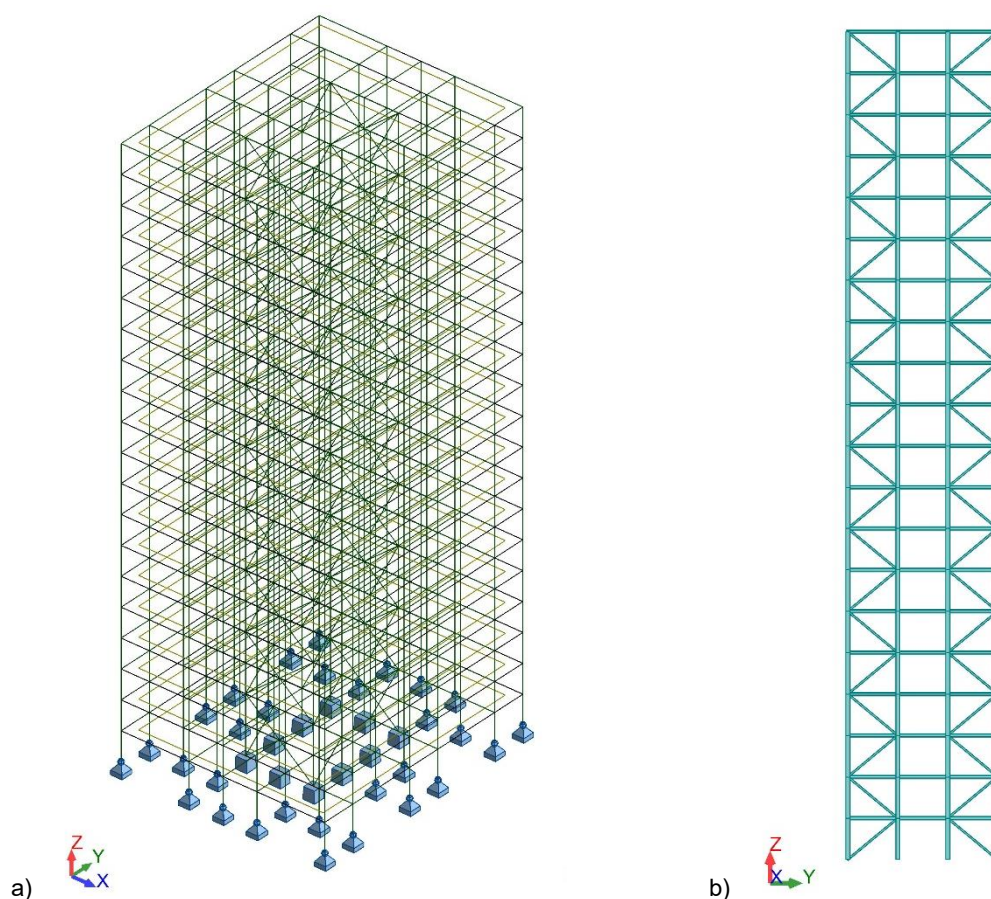


Figura 6.18. a) Modelo 3D de cálculo del edificio entero. b) Definición de los perfiles del núcleo resistente. Fuente: Software Robot Structural Analysis

Se decide arriostrar el núcleo central mediante diagonales en las esquinas.

A nivel de uniones, en el modelo se consideran rígidas las uniones del propio núcleo generando una estructura porticada capaz de asumir los esfuerzos horizontales del edificio.

Las uniones entre módulos serán articuladas ya que al tratarse de sistemas autoportantes no precisan de transmitir momento al elemento contiguo, solamente se debe garantizar una unión correcta que evite desplazamientos y transmita los esfuerzos de axil y cortante hasta la cimentación.

La conexión de cada módulo con el núcleo central también será articulada para evitar la transmisión de esfuerzos del núcleo hacia los módulos puesto que éste ha de ser capaz de soportar las solicitaciones de estabilidad sin la colaboración directa de los módulos.

Debido a su longitud, los pilares serán suministrados a tramos que deberán unirse a lo largo del edificio. Utilizando una de las soluciones más usuales, se determina que el cambio de tramo se realizará entre plantas por tal de tener la unión de planta con la viga y la diagonal más limpia.

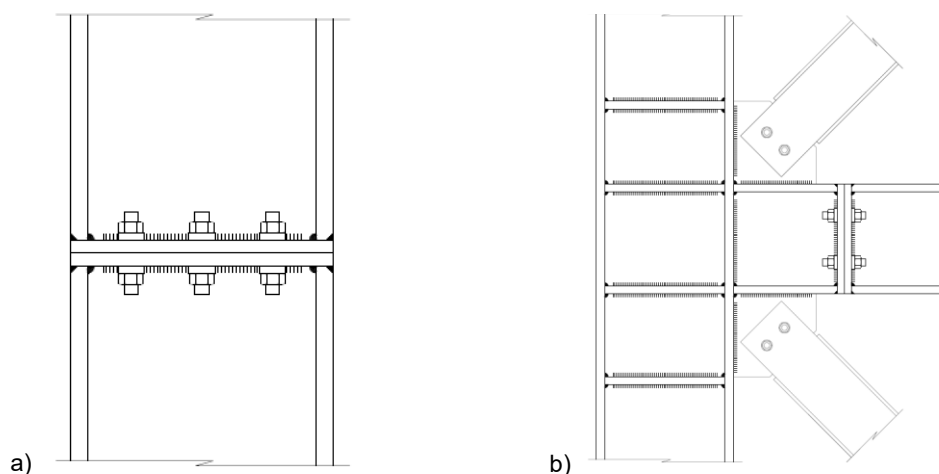


Figura 6.19. a) Unión entre pilares (entre plantas). b) Detalle de unión de pilar con viga y diagonales.

Se prevé que el pilar venga con una unión soldada preparada de taller para en obra atornillar los perfiles que conectan, de tal manera que se agiliza la construcción.

Deformaciones

A continuación se muestran en la Figura 6.20 y Figura 6.21, el desplome total (del edificio) y el desplome local (de la planta), que son las condiciones ELS del sistema.

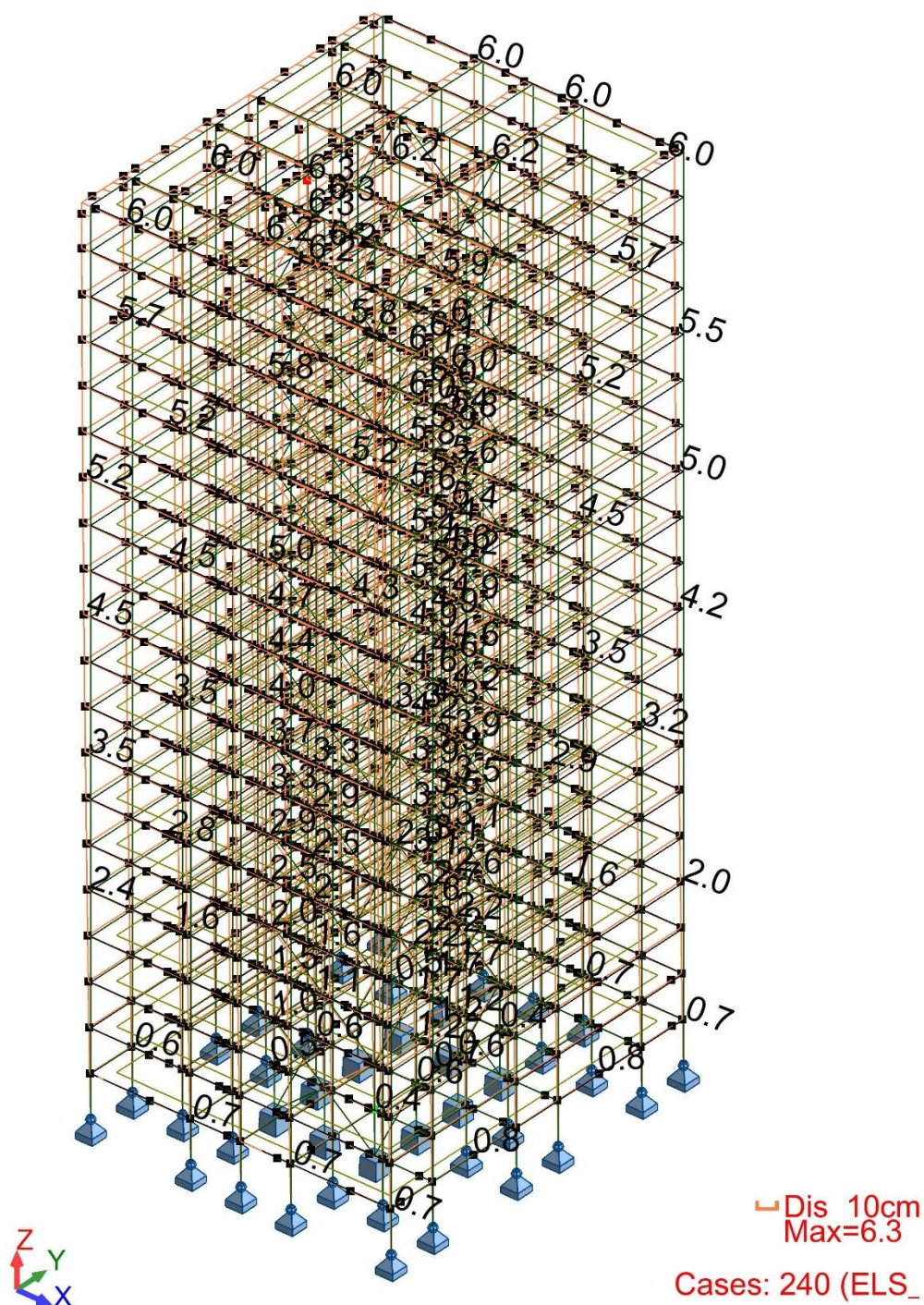


Figura 6.20. Deformación del edificio en hipótesis de Estado Límite de Servicio debido a la acción del viento
Fuente: Software Robot Structural Analysis.

El desplazamiento máximo del edificio es de 6,30 cm, para una altura total de $h = 60$ m obtenemos una relación de $L/952 > L/500$ que exige para el desplome total la normativa aplicable (CTE-DB-SE 2009).

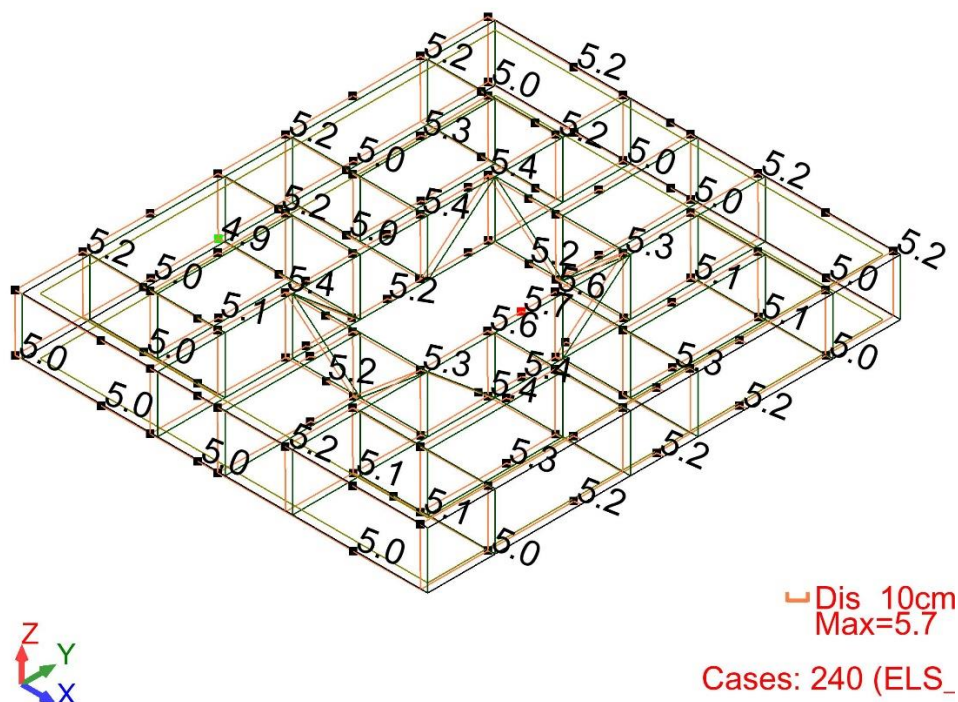


Figura 6.21. Deformación de una planta del edificio. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

El desplazamiento máximo por planta en el edificio es de $(5,70 - 5,00)$ 0,70 cm. Para una altura de planta de $h = 3$ m la relación que se obtiene es de $L/428,5 > L/250$ que exige como desplome local la normativa aplicable (CTE-DB-SE 2009).

Estado tensional

En la Figura 6.22, Figura 6.23 y Figura 6.24, se representan los diagramas del axil, el cortante y el momento flector máximos obtenidos en la simulación, respectivamente. Se tiene que tener en cuenta de que estos diagramas representan secciones de toda la estructura, donde se producen las reacciones máximas. Por tanto, estas reacciones máximas no se dan en un único pilar o viga, sino es la suma de dos pilares o vigas, que, al ser modelizados, se representan como un único elemento estructural.

Por ello, a primera vista, puede parecer que el dimensionado es erróneo al obtener unas reacciones, en estos diagramas, mayores a las obtenidas en el apartado 6.1.1, donde se dimensionó el módulo, pero si se revisa el Anexo I Estructura, apartado Comprobación tensional de los perfiles del módulo, se puede observar cómo, tanto los pilares como las vigas cumplen las prestaciones exigidas.

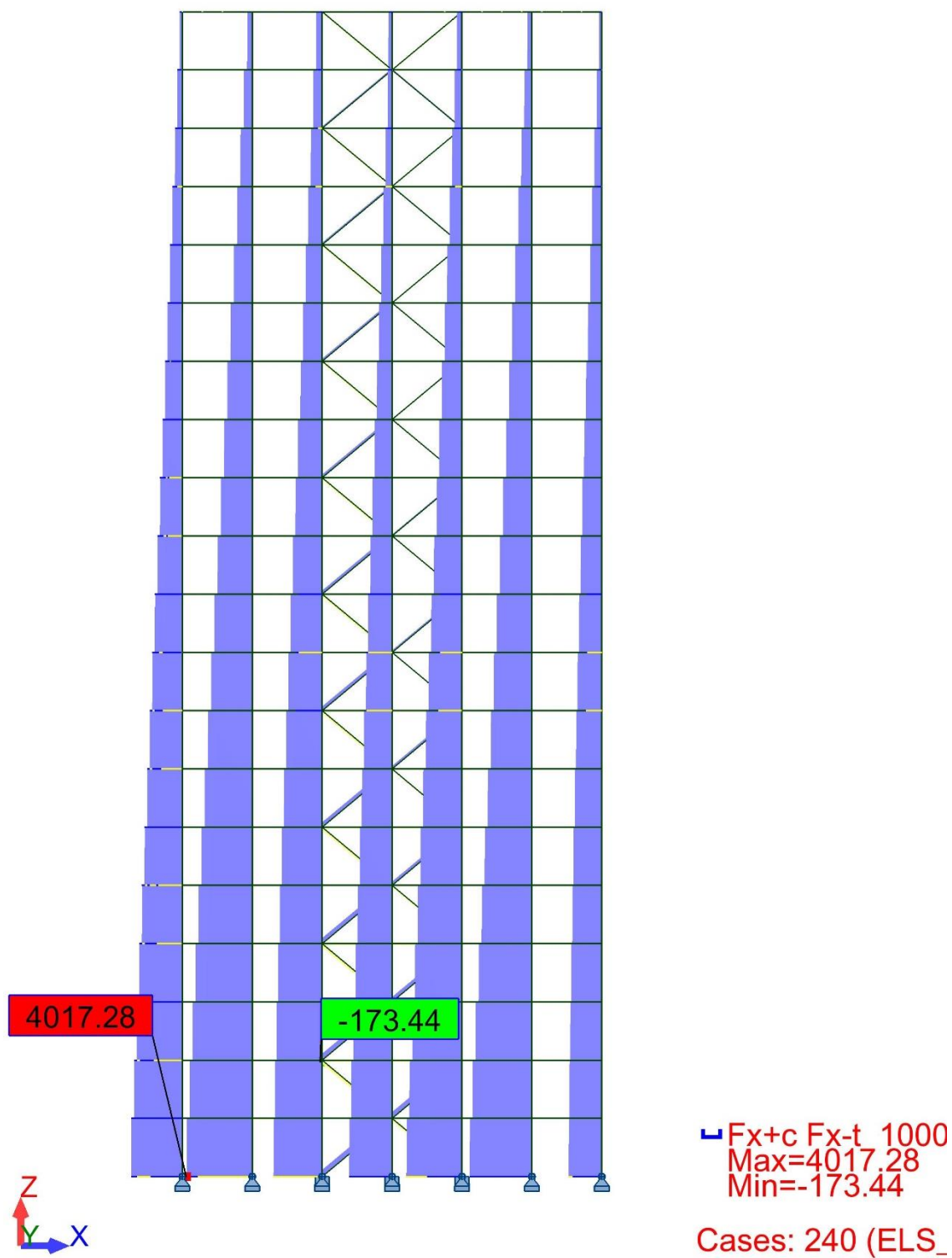


Figura 6.22. Diagrama estado tensional de la estructura– Axil. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

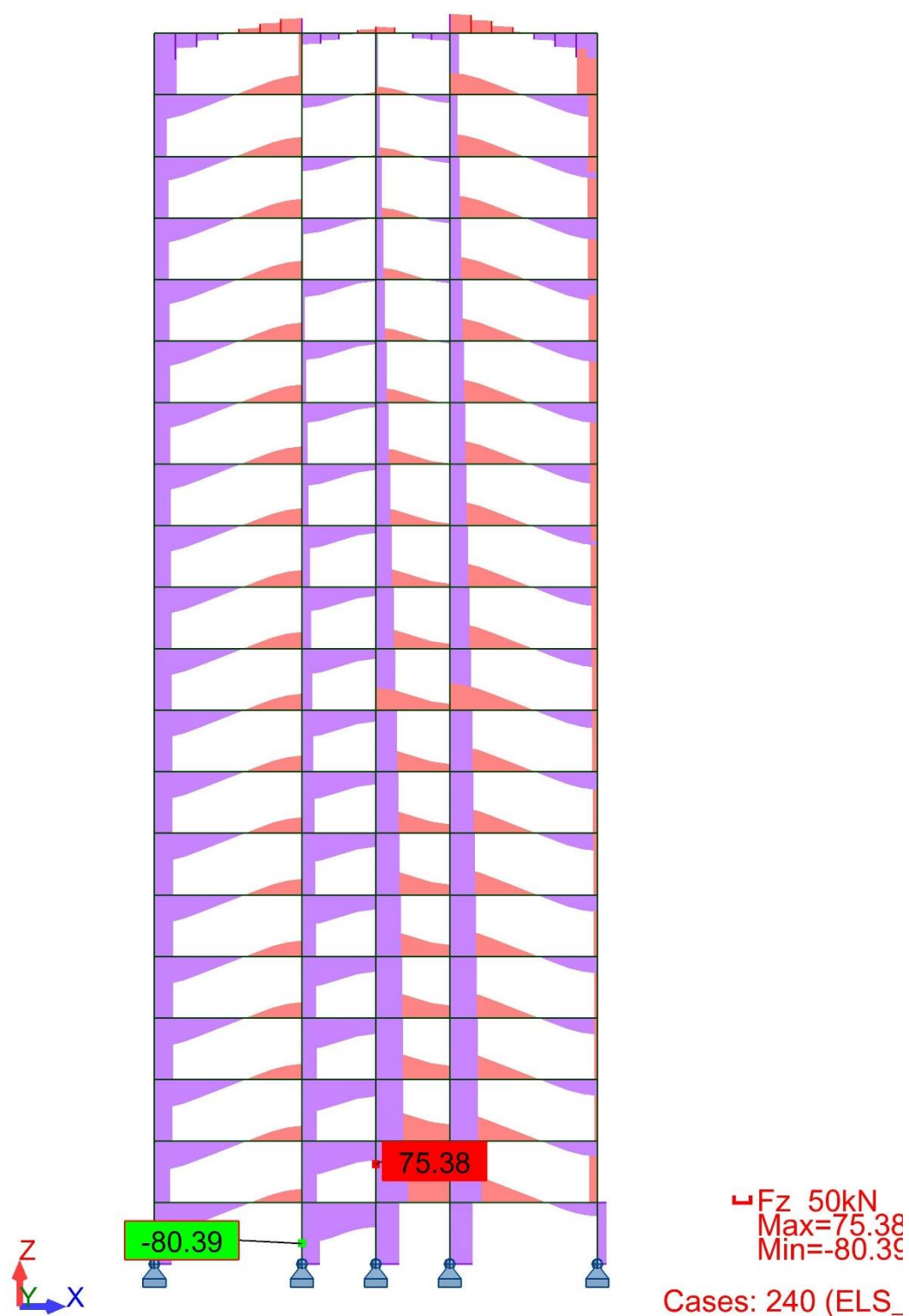


Figura 6.23. Diagrama del estado tensional de la estructura – Cortante. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

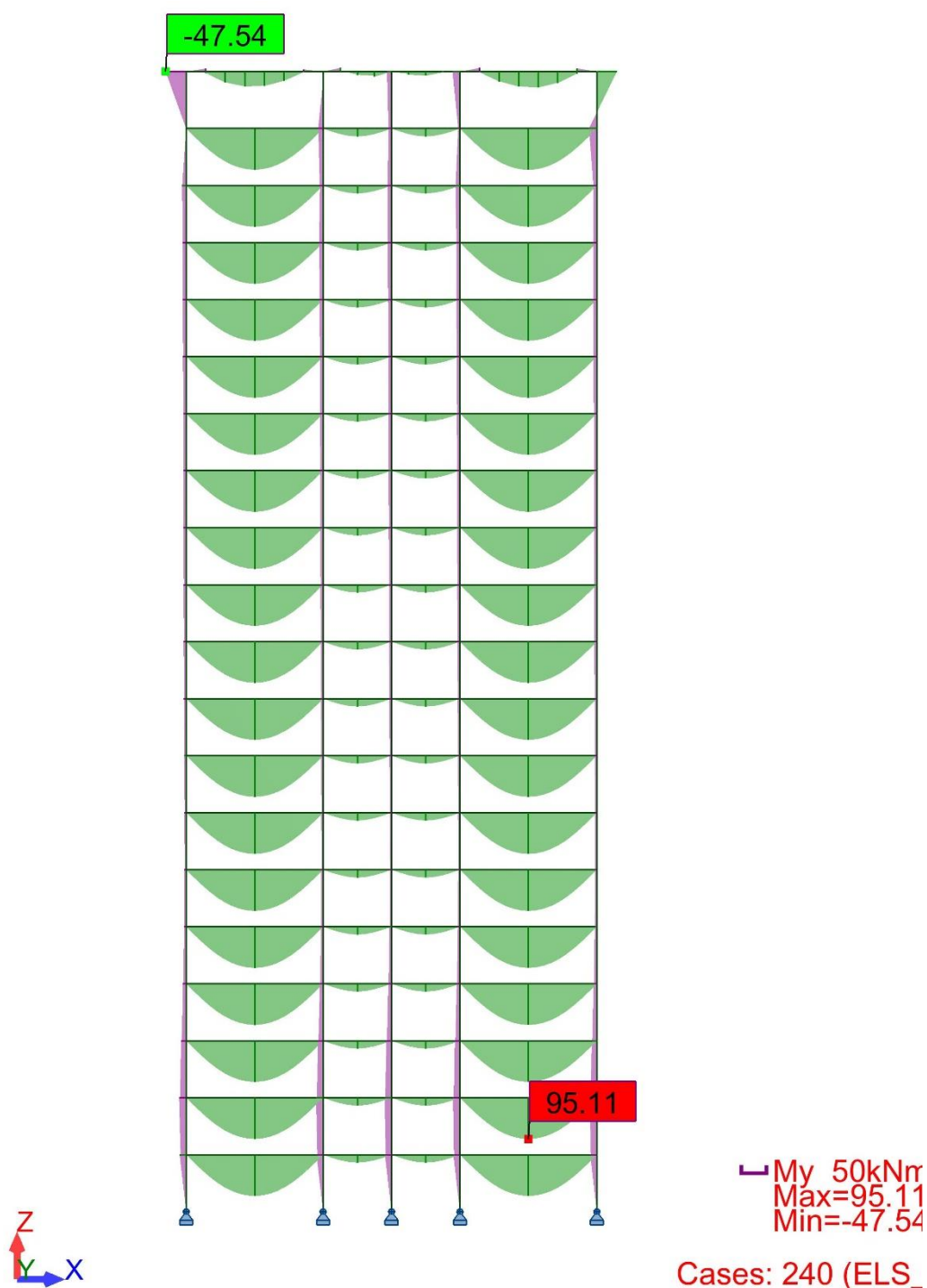


Figura 6.24. Diagrama del estado tensional de la estructura – Momento Flector. Fuente: Software Robot Structural Analysis.

Se confirman los perfiles del módulo de la siguiente manera:

- Pilares SHS 200x200x15mm acero S355.
- Vigas HEM 200 acero S355.

Se definen los perfiles del núcleo central de la siguiente manera:

- Pilares HEB 300 acero S355.
- Vigas HEB 240 acero S355.
- Diagonales HEB 140 acero S355.

En los Anexos I Estructural, Comprobación tensional de la estructura del núcleo, se pueden ver los informes proporcionados por el programa informático. En ellos se proporcionan, las capacidades y los esfuerzos de los perfiles del núcleo resistente, cálculos de pandeo y verificaciones de desplazamiento.

6.2.3. Cimentación

El tipo de cimentación a diseñar dependerá de tipo de estructura y la carga total a transmitir, además de la profundidad de la capa resistente del terreno. Una cimentación inadecuada, mal diseñada o calculada puede producir asentamientos diferenciales en el edificio y los terrenos colindantes, que pueden provocar el deterioro o/y el colapso de la estructura.

Si la capa resistente del terreno queda muy próxima a la superficie del terreno se escogerá la cimentación superficial.

Losa de cimentación

La cimentación por losa, también conocida como cimentaciones por placa, es aquella cimentación superficial que se dispone en plataforma, la cual tiene por objeto transmitir las cargas del edificio al terreno distribuyendo los esfuerzos uniformemente. Tiene muy buen comportamiento en terrenos poco homogéneos que con otro tipo de cimentación podrían sufrir asentamientos diferenciales, también en terrenos con muy poca capacidad portante. Las losas más sencillas son las losas de espesor constante.

Estas losas se utilizan para evitar que la presión total por centímetro cuadrado que transmite la cimentación supere la tensión admisible del terreno. Ocupan toda la superficie del edificio en contacto con el terreno. Acostumbran a estar muy armadas y se utiliza mucho hormigón.

Por consiguiente, la cimentación superficial por losa es una buena solución cuando:

- La construcción posee una superficie pequeña en relación con el volumen (rascacielos, depósitos, silos).
- En terrenos malos, poco resistentes ($0,15 \text{ N/mm}^2$), poco homogéneos o cuando se han de transmitir cargas muy elevadas.

- El terreno de asiento es flojo y de gran espesor y los pilotes a colocar serían exageradamente largos.

Ver el capítulo 10.8 de “Cálculo de estructuras de cimentación” (Calavera 2000) dónde se exponen las recomendaciones a seguir para una correcta aplicación de las losas de cimentación.

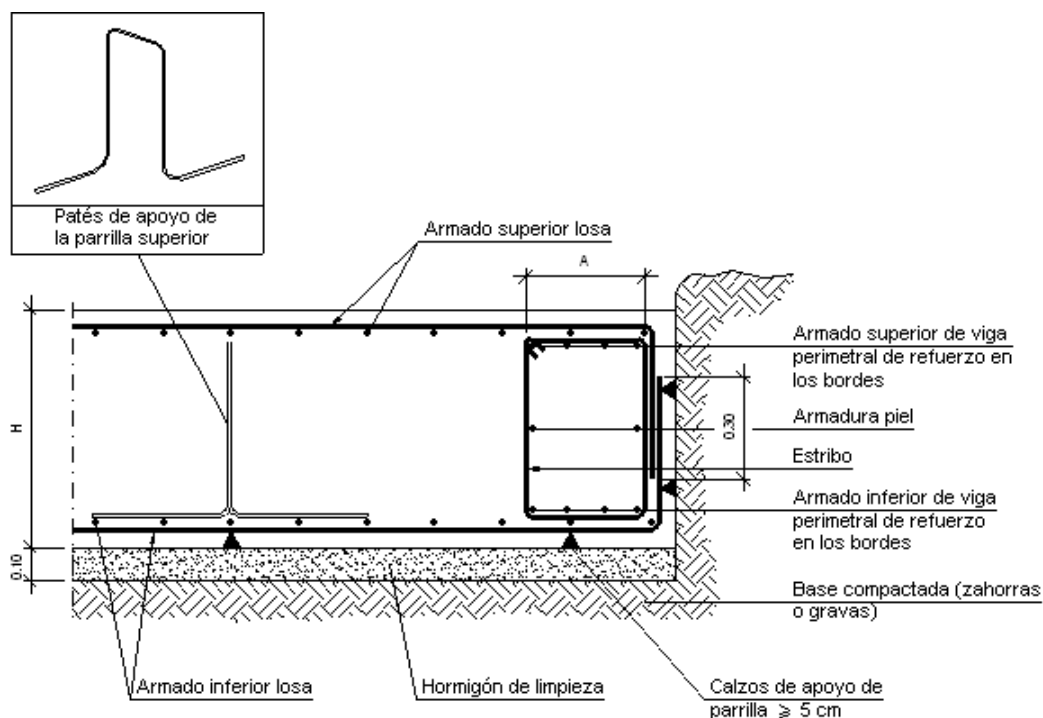


Figura 6.25. Detalle losa de cimentación Fuente: www.detallesconstructivos.cype.es

Se recomienda que la losa de hormigón se establezca sobre una solera de asiento u hormigón de limpieza de 10 cm de espesor mínimo, a fin de permitir la fácil colocación de las armaduras evitando el contacto directo con el terreno. Los recubrimientos de las armaduras de la losa serán las especificadas por la EHE.

6.2.4. Diseño de la losa de cimentación

La resolución y dimensionamiento de una losa de cimentación no es trivial. El método más preciso y óptimo consistiría en una resolución mediante elementos finitos mediante un programa informático, no obstante, en (Calavera 2000) se expone una metodología conservadora de resolución. Dicha resolución pasaría por considerar un emparrillado de vigas virtuales, como se puede observar en la imagen de más abajo, Figura 6.26.

Estas vigas virtuales rígidas englobarían los puntos de apoyo (o nodos) de la estructura del edificio en la losa, tanto en eje X y como en eje Y (ver Anexos I – Cálculo de cimentación). La

placa de este estudio permite un total de 15 combinaciones de vigas virtuales posibles, 8 en el eje X y 7 en el eje Y (ver tabla de los Anexos I – Cálculo de cimentación). Por consiguiente, vigas del eje X tendrán una dimensión de 3,6 x 25,2 m y del eje Y serán de 3,6 x 28,8 m, en ambos casos se considera un voladizo de 1,8 m en cada extremo de la viga y los puntos de apoyo serán centrados en lo ancho de la viga.

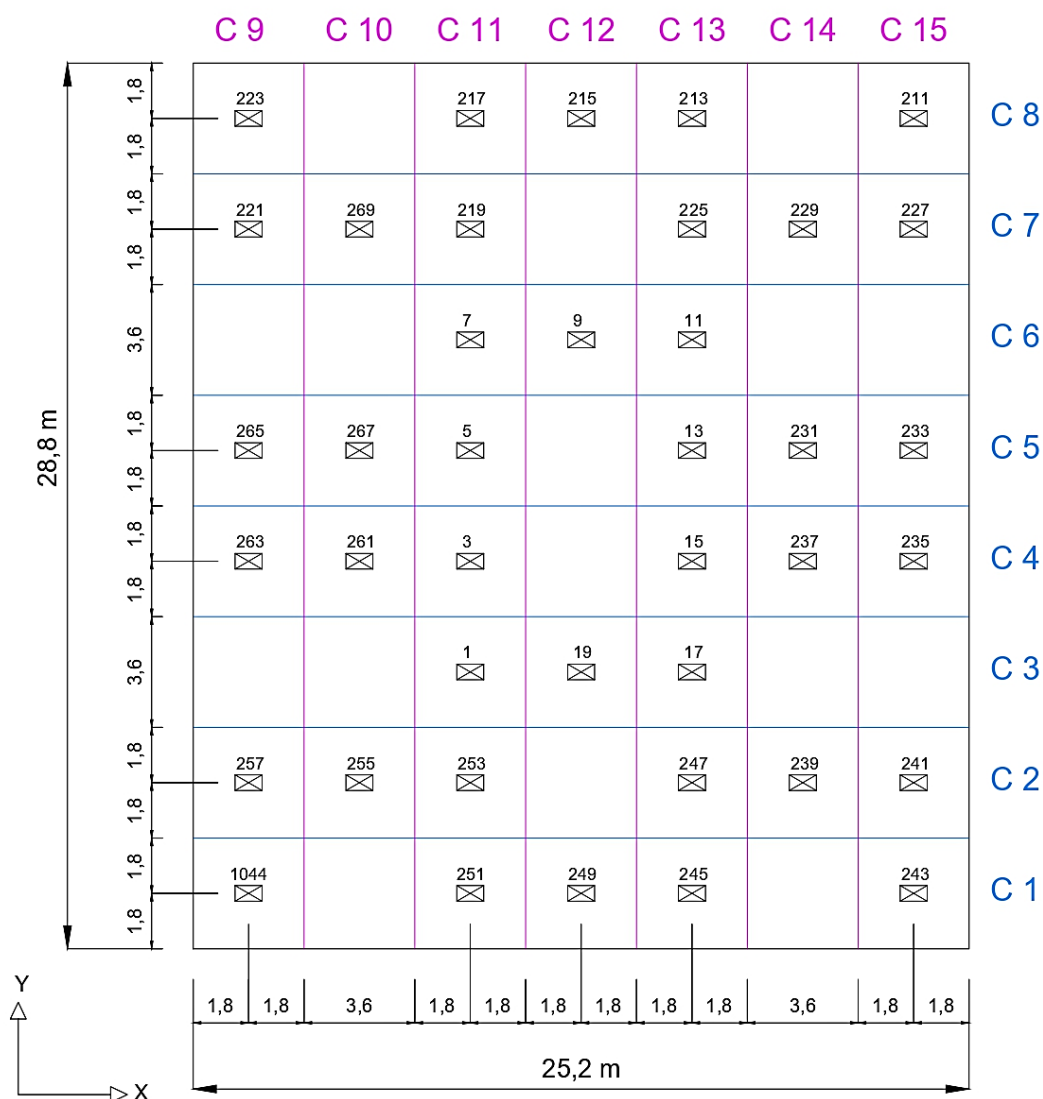


Figura 6.26. División de la losa según las 15 combinaciones de vigas virtuales posibles. Fuente: Elaboración propia

Una vez hecha la división de la losa en vigas virtuales, mediante el método descrito en (Calavera 2000), se tiene que proceder al cálculo de las excentricidades y acciones globales que se dan en la losa de cimentación. Dichas excentricidades y acciones quedan reflejadas en la Tabla 6.25. Tabla de elaboración propia.

Expresión	Valor	Unidades	Definición
$x_g = \frac{\sum N_i \cdot x_i + \sum M_{xi}}{\sum N_i} =$	11,92	m	Coordenada de la excentricidad en eje X
$y_g = \frac{\sum N_i \cdot y_i + \sum M_{yi}}{\sum N_i} =$	14,41	m	Coordenada de la excentricidad en eje Y
$e_x = x_g - \frac{a_{losa}}{2} =$	-0,68	m	Excentricidad en el eje X
$e_y = y_g - \frac{b_{losa}}{2} =$	0,01	m	Excentricidad en el eje Y
$R = \sum N_i =$	103220,31	kN	Resultante de las acciones

Tabla 6.25. Excentricidades y acciones globales en la losa de cimentación. Fuente. Elaboración propia.

Con esta información es posible determinar la distribución de presiones bajo la losa, en sus cuatro vértices, mediante la siguiente expresión (Calavera 2000):

$$\sigma_{ti} = \frac{R}{ab} + \frac{12R \cdot e_x(x_i - x_g)}{ba^3} + \frac{12R \cdot e_y(y_i - y_g)}{ab^3} + \rho_{horm} \cdot h_{losa}$$

Ecuación 6.5

La resolución de las vigas virtuales, propuesta por (Calavera 2000) pasa por plantear las ecuaciones de equilibrio respecto a los ejes X e Y y llamando q al peso por metro lineal de la viga se tiene:

$$\begin{cases} \sum N_i + q \cdot L + R = 0 \\ \sum M_i + \sum N_i \cdot x_i + \frac{1}{2} q \cdot L^2 + R \cdot x_R = 0 \end{cases}$$

Ecuación 6.6 y Ecuación 6.7

Sistema que resuelto define el valor y la posición de la resultante de los esfuerzos transmitidos por la estructura y el cimiento al terreno.

La ley de distribución de presiones sobre el terreno viene dada por las fórmulas generales:

$$\text{Si } e \leq \frac{L}{6}$$

$$\sigma_t = \frac{R}{bL} \cdot \left(1 \pm \frac{12e \cdot \left(x - \frac{L}{2} \right)}{L^2} \right)$$

Ecuación 6.8

Donde L es la longitud de la viga virtual en cada combinación y b es el ancho, que siempre

será igual a 3,6 m.

Con los valores extremos determinados por:

$$\text{Ecuación 6.9} \quad \sigma_{t1} = \frac{R}{b \cdot L} \cdot \left[1 + \frac{6e}{L} \right]$$

$$\text{Ecuación 6.10} \quad \sigma_{t2} = \frac{R}{b \cdot L} \cdot \left[1 - \frac{6e}{L} \right]$$

Y como pendiente de la variación de las presiones:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{L}$$

Ecuación 6.11

El cálculo de esfuerzos en el cimiento se realiza en general con las presiones σ_t sin contar el peso propio de la viga ya que no implicaría ninguna variación en el cálculo del momento flector de la viga virtual.

Se presenta la Tabla 6.26, donde vienen recogidas las dimensiones finales de la losa de cimentación calculada. Los cálculos detallados se pueden encontrar en los Anexos I Estructura, Cálculo de cimentación.

Característica	Valor	Unidades	Definición
a_{losa}	25,2	m	Ancho de la losa de cimentación (eje X)
b_{losa}	28,8	m	Largo de la losa de cimentación (eje Y)
h_{losa}	1,5	m	Altura o profundidad de la losa de cimentación
$\rho_{hormigón}$	25	kN/m ³	Densidad del hormigón (*)
q	37,5	kN/m ²	Peso propio superficial

Nota:

(*) 2500 kg/m³ cogiendo la gravedad igual a 10 m/s².

Es importante no confundir las dimensiones a_{losa} y b_{losa} de toda la losa de cimentación con las dimensiones de las vigas virtuales, expuestas más adelante.

Tabla 6.26. Dimensiones de la losa de cimentación diseñada. Fuente: Elaboración propia.

6.2.5. Cálculo de la armadura a flexión

En la Tabla 6.27. Cargas de diseño de la losa de cimentación, de elaboración propia, se recogen las reacciones obtenidas mediante el software informático de toda la estructural. Dichas reacciones serán las cargas aplicadas en la losa.

El hormigón y el acero que se van a utilizar, serán los marcados de (Fomento 2011) y vienen recogidos en la Tabla 6.28.

Cargas	Valor	Unidades	Definición
M_d	16541	kNm	Momento flector de diseño máximo (viga virtual C10)
N_d	4017,28	kN	Momento axil de diseño máximo (viga virtual C10)

Tabla 6.27. Cargas de diseño de la losa de cimentación. Fuente: Elaboración propia.

Hormigón HA 25			
Característica	Valor	Unidades	Definición
f_{ck}	25	N/mm ²	Resistencia característica del hormigón a compresión
γ_c	1,5	--	Coefficiente de minoración de la resistencia del hormigón
f_{cd}	16,7	N/mm ²	Resistencia de cálculo del hormigón a compresión
Acero B 500 S			
f_{yk}	500	N/mm ²	Tensión del límite elástico del acero
γ_s	1,15	--	Coefficiente de minoración de la resistencia del acero
f_{yd}	434,8	N/mm ²	Tensión de cálculo del límite elástico del acero minorada

Tabla 6.28. Características de los materiales (hormigón y acero) utilizados en la losa. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se presenta la Tabla 6.29. En dicha tabla se exponen las dimensiones de la viga virtual, las dimensiones de la armadura y la separación entre las barras. El cálculo detallado del dimensionado se puede encontrar en los Anexos I Estructura, Cálculo de la cimentación, junto con todas las comprobaciones de ELS y ELU que se han llevado a cabo.

Dimensiones	Valor	Unidades	Definición
b	3600	mm	Ancho viga virtual
h	1500	mm	Altura viga (losa)
\emptyset	20	mm	Diámetro barra armadura
r	70	mm	Recubrimiento armadura (Calavera 2000)
\emptyset_t	14	mm	Armado transversal cada 150 mm
d	1406	mm	Canto útil
n	47	--	Nº de barras en cada cara de la losa y en una dirección
s	41,91	mm	Separación entre barras del armado

Tabla 6.29. Dimensiones y características de la viga virtual de diseño. Fuente: Elaboración propia.

Así pues, la losa de cimentación tendrá $47 \times 8 = 376$ barras de diámetro 20 en eje X, tanto para la cara superior como inferior. Además, tendrá $47 \times 7 = 329$ barras del mismo diámetro en eje Y, tanto para la cara superior como inferior. Dando lugar, de este modo a una parrillada de 376×329 barras por cada cara.

6.3. Dimensionamiento de las instalaciones

6.3.1. Climatización y ventilación centralizadas

El correcto dimensionado de la climatización de un edificio pasa por el cálculo de las cargas térmicas a las que esté sujeto el edificio del estudio. El concepto de carga térmica está asociado a sistemas de calefacción, climatización y acondicionamiento de aire. Esta hace referencia a la energía en forma de calor a aportar o extraer los diferentes locales. Es decir, la sola licitación térmica a controlar en sistemas de climatización.

Una vez se ha calculado las cargas térmicas de cada local, éstas deben ser contrarrestadas haciendo uso de los diferentes sistemas térmicos, así como de los diferentes tipos de intercambiadores de calor.

Se tienen dos tipos de cargas térmicas:

- Carga térmica de verano.
- Carga térmica de invierno.

Dentro de la carga térmica de verano se tiene dos tipos de carga:

- Carga sensible: Calor que entra en el local como consecuencia de la diferencia de temperaturas.
- Carga latente: Calor que entra en el local como consecuencia de la diferencia de humedades.

Para la carga térmica de invierno sólo se tiene en cuenta la carga sensible, ya que no hay variación de humedad.

Los factores de los que dependen las cargas sensibles son las siguientes:

- Transmitancia térmica de los cerramientos.
- Situación geográfica; zona climática, radiación solar.
- Ventilación sensible del local.
- Equipos electrónicos y focos de calor del local; leds, fluorescencia, etc.

Los factores de los que dependen las cargas latentes son las siguientes:

- Número de ocupantes del local.
- Ventilación latente e infiltraciones del local.

Por consiguiente, se trata de una cantidad relevante de factores que influyen en el cómputo total de las cargas. Por ellos, el estudio exhaustivo y preciso de un edificio de gran altura, como es el de este proyecto, supone en sí mismo un proyecto considerable. Por tanto queda fuera del alcance de este estudio.

En su lugar se utilizarán algunas técnicas de cálculo rápido y simplificado que existen hoy en día y son empleadas tanto por los instaladores y proveedores profesionales del sector como por los arquitectos.

Técnicas de cálculo de la refrigeración necesaria

Como se comentó anteriormente, en el cálculo de frigorías (como se conoce la potencia frigorífica por los instaladores, donde 1 kWf = 860 frigorías) necesaria en un aparato de aire acondicionado para absorber el calor de un recinto intervienen numerosos factores: superficie de las paredes, el techo, temperatura exterior, superficie acristalada, orientación de la habitación, sombras exteriores, ubicación geográfica, época del año, materiales de construcción. etc.

En la práctica, según (Arnabat 2008), se utiliza como base del cálculo de frigorías unas 100 frigorías por metro cuadrado. Sin embargo, con el objetivo de fomentar la eficiencia energética se recomienda reducir este cálculo a la mitad. Es decir, calcular unas 50 frigorías por metro cuadrado para un tratamiento más eficiente del aire acondicionado. De esta forma, se instala un equipo con menor potencia que refrigerará el ambiente de forma más progresiva.

Si el recinto tiene una gran carga térmica por disponer de una gran superficie acristalada o por el color oscuro de la pared exterior que absorbe más radiación o el recinto está en una zona calurosa, etc., se recomienda incrementar la base del cálculo de 100 a 130 frigorías metro cuadrado. En caso de habitaciones muy soleadas o áticos se deben incrementar los valores en 15%. Si existen fuentes de calor (como por ejemplo, la cocina) hay que aumentar la potencia en 1 Kw.

Así pues, un cálculo sencillo daría un resultado de:

$$\left(126 \text{ m}^2 \cdot 50 \frac{\text{frigorías}}{\text{m}^2} + 860 \frac{\text{frigorías}}{\text{cocina}} \right) \cdot \frac{1}{860} \frac{\text{kW}}{\text{frigorías}} = 8,33 \text{ kW}$$

Ecuación 6.12

Pero si se realizan los cálculos según el método de pre-dimensionado utilizado en las escuelas

de arquitectura para la refrigeración de la vivienda se utilizan los siguientes valores:

- Humedad exterior 16,5 g/kg de aire seco.
- Humedad interior 6,3 g/kg de aire seco.
- Temperatura seca en verano en Barcelona (humedad coincidente 2,5% datos según UNE 100.001-85): 28,4C°

La demanda del local es:

$$\text{Ecuación 6.13} \quad C_l = C_{sensible} + C_{latente}$$

$$\text{Ecuación 6.14} \quad C_{sensible} = F_s \cdot S_u$$

$$\text{Ecuación 6.15} \quad C_{latente} = F_l \cdot N$$

Donde:

- S_u : superficie útil de la vivienda es de 126 m².
- F_s : Factor para una vivienda unifamiliar con buena protección, igual a 60 kcal/h.
- F_l : Factor para una persona con actividad moderada, igual a 56 kcal/h.
- N : N° de personas por vivienda.

Valores F_s y F_l para las condiciones climáticas descritas anteriormente.

Como se puede apreciar, la diferencia entre ambos métodos es poca, pero hay que tener en cuenta de que se trata de un método aproximado. Por tanto, a continuación, y de acuerdo con el segundo método de cálculo de potencia frigorífica necesaria, se adjuntan las siguientes tablas; Tabla 6.30 y Tabla 6.31.

Vivienda	N° módulos	Área modulo	Superf. útil (m ²)	n° personas/vivienda	C_s (kcal/h)	C_l (kcal/h)	Demanda total por local	
							(kcal/h)	(kW)
Tipo 1	4	25,2	100,8	4	6048	224	6272	7,29
Tipo 2	5	25,2	126	6	7560	336	7896	9,18

Tabla 6.30. Demanda de potencia frigorífica por tipo de vivienda. Fuente: Elaboración propia.

Vivienda	Nº viviendas	Nº locales (*)	Total zonas	Potencia frigorífica necesaria por tipo de zona (kW)	Potencia frigorífica total necesaria (kW)
Tipo 1	38	1	39	284,31	642,33
Tipo 2	38	1	39	358,02	
(*)	Locales destinados a otros usos.				

Tabla 6.31. Demanda de potencia frigorífica total del edificio. Fuente: Elaboración propia.

A los locales destinados a otros usos que no sean de vivienda, se les asignará una demanda de potencia frigorífica igual a la de las viviendas.

A partir de los datos obtenidos, se tendrá que escoger una central térmica (enfriadora) capaz de proporcionar toda la potencia necesaria demandada por todo el edificio, de forma centralizada. Además de una unidad terminal (fancoil).

Central térmica

Los sistemas de climatización centralizada se basan en un conjunto de consumidores cuyas demandas energéticas se ven satisfechas por una única planta de generación de energía. La climatización de distrito es un concepto poco extendido en España, pero no así en el resto de Europa, donde su uso está generalizado. Estos sistemas utilizan el agua como elemento caloportador.

Con la climatización centralizada se cubren las necesidades de refrigeración y calefacción durante todo el año, con un alto grado de fiabilidad. El agua se distribuye a cada uno de los consumidores mediante tuberías, a través de una instalación a 4 tubos (frío y calor) o 2 tubos (frío o calor).

La producción centralizada proporciona una serie de ventajas, siendo la mejor solución para complejos o edificios de demanda elevada. Las más importantes, de acuerdo a (Departamento Técnico de Climatización (Cofrico) 2018), pueden resumirse en:

- Mayores rendimientos debido al mayor tamaño de los equipos, más eficientes cuanto mayor sea su capacidad.
- Menores gastos energéticos para la generación de agua para climatización.
- Mejor adaptación del sistema de cargas parciales y redundancia de los equipos de producción de energía.
- Menores costes de mantenimiento al tener centralizada la producción.

- Mayor facilidad de gestión, puesto que se centralizará en un solo sistema general.
- Centralización de los focos de ruido, lo cual permite adoptar las medidas correctoras necesarias en la localización de este ruido, de forma también centralizada.

Unidad terminal

Una instalación de aire acondicionado por conductos se compone de un sistema centralizado de distribución del aire a través de un falso techo. El mejor sistema de aire acondicionado por conductos es aquel que se puede regular mediante un sistema de rejillas programables estratégicamente colocadas por donde sale el flujo del aire.

El sistema de conductos de distribución del aire, que en el caso de tratarse de una bomba de calor puede distribuir tanto calor como frío, tiene la ventaja de que la instalación queda totalmente integrada en la casa o el local, sin tener aparatos a la vista. A continuación se comentan algunas de las ventajas, según (Arnabat 2015).

Zonificación: proporciona la capacidad de regular la temperatura y flujo del aire en cada estancia o zona del local o vivienda.

En una instalación zonificada cada habitación tiene su propio termostato que se comunica con una rejilla motorizada. En cuanto se alcanza la temperatura fijada, la rejilla cierra el paso del aire para no sobre-enfriar la estancia. La rejilla abre en cuanto la habitación vuelve a necesitar climatización. De esta manera se ahorra energía y se garantiza el confort.

Estética: generalmente los conductos del aire acondicionado se instalan en falsos techos, con lo que se evita la instalación de los aparatos split de bomba de calor que ocupan un sitio considerable en la pared de la estancia.

Mediante el sistema de conductos, sólo se verán unas pequeñas rejillas por donde se distribuye el aire, lo cual resulta más discreto y estético.

Ventilación

La ventilación de un edificio de viviendas es cubierta por capítulo 3 de (CTE-DB-HS 2017), calidad del aire interior, donde se especifican los caudales de aire de admisión y extracción que se tienen que proporcionar, según cada tipo de vivienda. Los resultados son expuestos en la siguiente tabla (véase Tabla 6.32). En los Anexos III Instalaciones, Climatización y Ventilación, se puede ver la tabla de desglose de estos valores.

Tipo Ventilación	Caudal de ventilación Q_v			
	1 vivienda (tipo 1 y 2)		Todo el edificio	
	(l/s)	(m ³ /h)	(l/s)	(m ³ /h)
Admisión	34	122,4	2720	9792
Extracción	35	126	2800	10080
Extracción cocina	50	180	3800	13680

Tabla 6.32. Demanda de ventilación por vivienda y para todo el edificio. Fuente: Elaboración propia.

Para satisfacer las exigencias del CTE y seguir, con la idea principal del proyecto, centralización de todos los servicios, se procederá a realizar, no solo la ventilación, sino también todo el tratamiento del aire del interior mediante una UTA.

Un climatizador o Unidad de Tratamiento de Aire (UTA), en inglés AHU (Air Handling Unit) permite realizar un tratamiento integral del aire utilizado en el sistema de climatización, controlando todas las variables del aire:

- Ventilación (aporte de aire exterior).
- Calidad de aire (filtrado).
- Temperatura (calentamiento o enfriamiento).
- Humedad (humectando en invierno y deshumectando en verano).

En lo relativo a las dimensiones, existen dos conceptos de UTA, unidades compactas y unidades modulares. Las UTA modulares, compuestas por secciones o módulos dependiendo de las necesidades particulares de cada instalación. Acostumbran a ser equipos de un tamaño considerable, por lo que suele resultar necesario ubicarlas en la cubierta del edificio o en un local específico que disponga de ventilación directa al exterior, para poder realizar la toma y expulsión de aire.

Éstos se caracterizan por un funcionamiento energético eficiente gracias a:

- La posibilidad de regulación del caudal de ventilación en función de medición de CO₂ en ambiente.
- La posibilidad de regulación del caudal total del equipo (sistema de caudal variable) en función de las condiciones térmicas del local, para lo cual se necesitarán variadores de frecuencia en los ventiladores.
- La posibilidad de realizar enfriamiento gratuito (free-cooling) directamente con el aire exterior sin atemperar cuando las condiciones climáticas lo permitan.

- La posibilidad de recuperación de parte de la energía térmica del aire que se expulsa al exterior.

Tabla de características de los equipos

Una vez que se ha definido los sistemas de climatización y ventilación a utilizar, calculadas las demandas y habiendo dimensionado el sistema, lo único que queda es la elección de los equipos que se van a instalar. Dichos equipos se escogen en función de su capacidad, eficiencia, coste y tamaño. A continuación, se presentan las tablas donde recogen las características de éstos; Tabla 6.33. Características del Fan-Coil. Fuente. Catálogo Daitsu. (Unidad terminal), Tabla 6.34. Características de la bomba de calor y solo frío. Fuente: Catálogo Clint. (Central térmica) y, por último, Tabla 6.35. Características de la unidad de tratamiento del aire. Fuente: Catálogo Bikat. (Climatizador).

Fan Coil		
Características	Valor	Unidades
Fabricante	Daitsu	--
Modelo	FDLD EC 40	--
Configuración	2 tubos (frío o calor)	--
Alimentación	230/1/50	V/fases/Hz
Potencia frigorífica (*)	9,54	kW
Potencia calorífica (**)	11,5	kW
FCEER^o	68,42 / B	Índice / Clase
FCCOP^o	82,62 / B	Índice / Clase
Caudal de aire	1880	m ³ /h
Caudal de agua	1663	l/h
Conexiones hidráulicas	19,05 / (3/4")	mm / pulgadas
Presión sonora	51/49/48	dB(A)
Peso funcionamiento	44	kg

Nota:

(*) Funcionamiento en frío: T^a del aire de retorno 27°C BS / 19 °C BH; Entrada/Salida de agua 7°C/12°C.

(**) Funcionamiento en calor: T^a del aire de retorno 20°C; Entrada de agua 50°C.

Tabla 6.33. Características del Fan-Coil. Fuente. Catálogo Daitsu.

Bomba de calor y solo frío		
Características	Valor	Unidades
Fabricante	Clint	--
Modelo	CHA/K/A/WP 24012 P	--
Sistema	Aire/Agua	--
Alimentación	400/3+N/50	V/fases/Hz
Potencia frigorífica (*)	669	kW
Potencia calorífica (**)	764	kW
EER	2,75	--
COP	3,32	--
Caudal agua	32,06	l/s
Conexiones hidráulicas	150	DN
Presión sonora	74	dB(A)
Peso funcionamiento	4770	kg
Dimensiones	7200/2200/2100	mm

Nota:

(*) Según (EN14511) T^a ambiente 35 °C, T^a Impulsión/Retorno de agua 7/12 °C.

(**) Según (EN14511) T^a ambiente 7 °C (bs), T^a Impulsión/Retorno de agua 45/40 °C.

Tabla 6.34. Características de la bomba de calor y solo frío. Fuente: Catálogo Clint.

Unidad de Tratamiento del Aire		
Características	Valor	Unidades
Fabricante	Bikat	--
Modelo	EHW 2069	--
Alimentación	400/3/50	V/fases/Hz
Potencia frigorífica (*)	--	kW
Potencia calorífica (*)	--	kW
Caudal de agua	11,776	m ³ /h
Caudal de aire	11200	m ³ /h
Conexiones hidráulicas	2"	pulgadas
Presión estática disponible	145	Pa
Filtros	F6	--
Peso funcionamiento	356	kg
Dimensiones	2600/980/750	mm

Nota:

(*) Unidad sin batería.

Tabla 6.35. Características de la unidad de tratamiento del aire. Fuente: Catálogo Bikat.

Canalización del sistema de ventilación y refrigeración entre módulos

Los conductos serán de paneles rígidos autoportantes de lana de vidrio de alta densidad debido a su fácil manipulación, instalación y posterior modificación. Revestidos por la cara exterior con una lámina de aluminio reforzada con papel kraft y malla de vidrio, que actúa como barrera de vapor, y por su cara interior, con un tejido neto de vidrio reforzado de color negro de gran resistencia mecánica. Por sus excelentes prestaciones acústicas y su buen comportamiento térmico, es la opción adecuada para la instalación de redes de conductos autoportantes de distribución de aire en las instalaciones térmicas de climatización de los edificios.

Además de las siguientes características:

- Sin riesgo de rotura durante su manipulación.
- Máxima clase de estanqueidad definida por el RITE.
- Resistencia a métodos de limpieza agresivos, UNE 100012.
- Exclusivo machihembrado de paneles.
- No proliferación de mohos y bacterias.
- Producto sostenible. 100% reciclable.

La unión y empalme con otros conductos se realiza de forma muy simple, solo basta con una cinta aislante y pegamento.

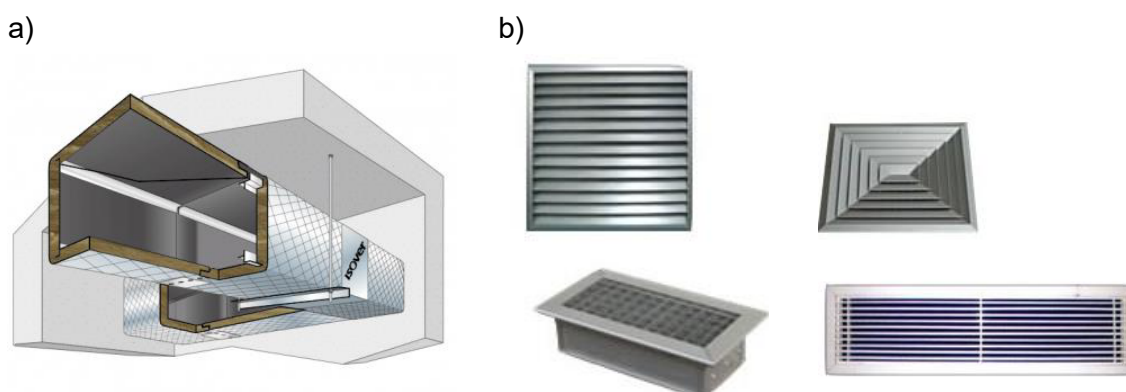


Figura 6.27. a) Conducto de lana de vidrio reforzado. b) Rejillas de impulsión y retorno. Fuente: a) Isover y b) www.plameya.com

Las características de la canalización que ha de llegar a cada fancoil ubicado en cada una de las viviendas vienen expresada en la Tabla 6.36, elaborada mediante la calculadora online de Isover.net.

Características	Impulsión	Extracción
Conducto	Lana de vidrio	Lana de vidrio
Caudal (m³/h)	122,4	126,0
Caudal (m³/s)	0,034	0,035
Diámetro equivalente conducto circular (mm):	127,86	129,26
Lado conducto cuadrado (mm):	117,05	118,32
Velocidad (m/s):	2,48	2,5
Pérdida de Carga (Pa/m):	1	1
Dimensión 1 (a x b) (cm):	11,7 x 11,7	11,83 x 11,83
Dimensión 2 (a x b) (cm):	15,0 x 9,0	15,0 x 9,5
Dimensión 3 (a x b) (cm):	20,0 x 7,0	20,0 x 7,0

Tabla 6.36. Características de los conductos de impulsión y extracción. Fuente: www.isover.net/programaconductos/

Los conductos que discurrirán por dentro del falso techo y se repartirá entre todos los módulos que forman la vivienda, se expresan en las dos siguientes tablas; Tabla 6.37 y Tabla 6.38.

Conductos de admisión	Q _v (l/s)	S = 2,5*Q _v (cm²)	Dimensión (cm)
Vivienda tipo 1			
Salón	18	45	9,0 x 5,0
Dormitorio doble	8	20	4,0 x 5,0
Dormitorio simple	4	10	2,0 x 5,0
Vivienda tipo 2			
Salón	10	25	5,0 x 5,0
Dormitorio doble	8	20	4,0 x 5,0
Dormitorio simple	4	10	2,0 x 5,0

Tabla 6.37. Características de los conductos de impulsión dentro de la vivienda. Fuente: Elaboración propia.

Conductos de extracción	Q _v (l/s)	S = 2,5*Q _v (cm²)	Dimensión (cm)
Vivienda tipo 1 y 2			
Baños	10	25	5,0 x 5,0
Cocina	15	37,5	7,5 x 5,0

Tabla 6.38. Características de los conductos de extracción dentro de la vivienda. Fuente: Elaboración propia.

Hay que tener en cuenta que el conducto de ventilación de admisión y climatización será el mismo, dado que se utiliza un sistema combinado de bomba de calor – climatizador – fancoil. Dónde, la bomba de calor subministrará el agua al fancoil que calentará o enfriará el aire filtrado y tratado de admisión del exterior, proporcionado por el climatizador o la unidad de tratamiento del aire.

6.3.2. Sistema eléctrico del edificio

Descripción del Edificio

Se trata de un edificio de nueva construcción y sin ningún edificio adosado, está constituido por una planta baja destinada a vestíbulo y con un local comercial, un conjunto de 19 plantas de 4 viviendas cada una.

No se ha definido ninguna ubicación concreta del edificio. Las instalaciones proyectadas se llevarán a cabo en un edificio de nueva construcción cumpliendo las normativas del Plan General de Ordenación Urbana (PGOU).

Potencia total prevista para el edificio

Las necesidades eléctricas del edificio se han calculado según el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión vigente, (REBT 2019). Este indica la potencia que hay que prever para las viviendas, el local y los servicios comunes del edificio.

El suministro de energía eléctrica la efectuará la Empresa Suministradora, desde su red general hasta la caja general de protección. La tensión de suministro será de 400 V entre fases y 230 V entre fase y neutro.

El promotor, propietario o usuario del edificio fijará de acuerdo con la Empresa Suministradora la potencia a prever, la cual, en este proyecto, no será inferior a 5750 a 230 V, en cada vivienda, independientemente de la potencia a contratar por cada usuario.

Potencias de las viviendas

En el caso de las viviendas la potencia a prever varía en función del grado de electrificación de la vivienda.

Que puede ser básico o elevado. Dependiendo de la superficie, la cantidad y el tipo de aparatos eléctricos, se escoge un bloque de contratación diferente. Se parte del condicionante que todas las viviendas disponen de instalación de aire acondicionado y gran cantidad de aparatos eléctricos, se ha decidido esta propuesta con el fin de ofrecer un alto nivel de confort y cubrir así las exigencias los futuros inquilinos.

Así pues, según la ITC-BT-10 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, para garantizar la conexión y utilización segura de los receptores usados, se debe considerar un grado de electrificación básico con una previsión de potencia mínima de 5750 W para cada vivienda.

Con un total de 76 viviendas y aplicando el coeficiente de simultaneidad que facilita el

Reglamento, se obtiene:

$$\text{Ecuación 6.16} \quad n = 19 \text{ plantas} \cdot 4 \frac{\text{viviendas}}{\text{planta}} = 76 \text{ viviendas}$$

$$\text{Ecuación 6.17} \quad C = 15,3 + \frac{(n - 21)}{2} = 42,8$$

$$\text{Ecuación 6.18} \quad P_H = \frac{\sum(n_i \cdot P_i)}{n} \cdot C = \frac{76 \cdot 5750 \cdot 42,8}{76} = 246100 \text{ W}$$

Donde:

- P_H : Potencia total de la vivienda.
- n_i : Número de viviendas con la misma potencia.
- P_i : Potencia de la vivienda.
- N : número total de viviendas.
- C : Coeficiente de simultaneidad de vivienda (para $n > 21$ de acuerdo a la Tabla 1 de la Guía BT-10).

Potencia del local comercial

Según la ITC-BT-10 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, la carga correspondiente a los locales comerciales y oficinas se calculará considerando un mínimo de 100 W por metro cuadrado y planta, con un mínimo por local de 3450 W a 230 V y coeficiente de simultaneidad de 1.

$$P_{LC} = 453,6 \text{ m}^2 \cdot 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 45360 \text{ W}$$

Ecuación 6.19

Potencia de los servicios comunes y generales

Será la suma de la potencia prevista en ascensores, aparatos elevadores, centrales de calor y frío, grupos de presión, alumbrado de portal, caja de escalera y espacios comunes y en todo el servicio eléctrico general del edificio sin aplicar ningún factor de reducción por simultaneidad (factor de simultaneidad = 1). Véase la Tabla A.III.6 de los Anexos III Instalaciones – Cálculo eléctrico.

En las siguientes tablas; Tabla 6.39 potencia prevista para el edificio, Tabla 6.40 y Tabla 6.41 se representan las características del circuito de la vivienda tipo I, y Tabla 6.42 y Tabla 6.43 se presentan para el tipo II.

Potencia prevista edificio						
Concepto	Cantidad	Superficie (m ²)	Grado electrificación	Potencia asignada (W)	Coefficiente de simultaneidad vivienda	Potencia instalada (W)
Viviendas	76	< 160	Básico	5750	42,8	246100
Servicios comunes	1	--	--	264401	--	272651
Locales	4	453,6	--	100	--	45360
TOTAL						564111

Tabla 6.39. Potencia prevista global del edificio. Fuente: Elaboración propia.

Viviendas de 100,8 m ²								
Circuito de utilización	P _{prev} (W)	F _s	F _u	N _T	I _a (A)	I _c (A)	I.A (A)	L (m)
C1 Iluminación	200	0,75	0,5	16	0,87	5,22	10	22
C2 Tomas de uso general	3450	0,2	0,25	16	15,00	12,00	16	22
C3 Cocina y horno	5400	0,5	0,75	2	23,48	17,61	25	15
C4 Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	3450	0,66	0,75	3	15,00	22,28	20	22
C5 Baño, cuarto de cocina	3450	0,4	0,5	6	15,00	18,00	16	22
C8 Aire acondicionado (*)	1250	--	--	1	5,43	--	16	10
C10 Secadora	3450	1	0,75	1	15,00	11,25	16	22

Donde:

P_{prev}: Potencia prevista por toma.

F_s: Factor de simultaneidad.

F_u: Factor de utilización.

N_T: Número de tomas.

I_a: Intensidad calculada por toma prevista.

I_c: Intensidad de cálculo.

I.A: Interruptor automático.

L: Longitud del circuito.

Nota:

Para todos los circuitos $\cos \phi = 1$ y $U = 230$ V.

La longitud más larga posible es la de 3 módulos a lo largo, es decir $7,2 \times 3 = 21,6$ m. Por tanto se tomará como el peor caso una longitud de circuito de 22 m.

La unidad terminal (el Fan-coil) estará situado en el módulo del salón, por tanto la longitud del circuito será menor.

c.d.t < 6,9 V (3%).

(*) En el circuito C8 (Fan Coil), al ser la central térmica (bomba de calor) centralizada y alimentada por LGA, la potencia es mucho menor y por consiguiente se puede ignorar la restricción de la sección mínima del circuito). Por tanto, también el interruptor automático, en vez de 25 se substituirá por uno de 16 A.

Tabla 6.40. Características de los circuitos de la vivienda tipo 1 (I). Fuente: Elaboración propia.

Circuito de utilización	S _F (mm ²)	I _{adm} (A)	c.d.t. (V)	S _p (mm ²)	S _N (mm ²)	Φ _T (mm)	Instalación / Aislamiento
C1 Iluminación	1,5	13	6,11	1,5	1,5	16	A1 - 2xPVC Cu Conductores aislados en un conducto en una pared térmicamente aislada
C2 Tomas de uso general	2,5	17,5	5,87	2,5	2,5	20	
C3 Cocina y horno	6	30	2,60	6	6	25	
C4 Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	4	23	4,58	4	4	20	
C5 Baño, cuarto de cocina	2,5	17,5	5,87	2,5	2,5	20	
C8 Aire acondicionado (*)	1,5	13	4,44	1,5	1,5	25	
C10 Secadora	2,5	17,5	5,87	2,5	2,5	20	

Donde:S_F: Sección de la fase.S_N: Sección del neutro.I_{adm}: Intensidad máxima admisible en el circuito (tabla A.52-1, UNE 20460-5-523:2004).

c.d.t.: Caída de tensión.

S_p: Sección de los conductores de protección.Φ_T: Diámetro del tubo de conducto de protección.**Tabla 6.41.** Características de los circuitos de la vivienda tipo 1 (II). Fuente: Elaboración propia.**Viviendas de 126 m²**

Circuito de utilización	P _{prev} (W)	F _s	F _u	N _T	I _a (A)	I _c (A)	I.A (A)	L (m)
C1 Iluminación	200	0,75	0,5	20	0,87	6,52	10	22
C2 Tomas de uso general	3450	0,2	0,25	18	15,00	13,50	16	22
C3 Cocina y horno	5400	0,5	0,75	2	23,48	17,61	25	15
C4 Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	3450	0,66	0,75	3	15,00	22,28	25	22
C5 Baño, cuarto de cocina	3450	0,4	0,5	6	15,00	18,00	20	22
C8 Aire acondicionado (*)	1250	--	--	1	5,43	--	25	10
C10 Secadora	3450	1	0,75	1	15,00	11,25	16	22

Donde:P_{prev}: Potencia prevista por toma.F_s: Factor de simultaneidad.F_u: Factor de utilización.N_T: Número de tomas.I_a: Intensidad calculada por toma prevista.I_c: Intensidad de cálculo.

I.A: Interruptor automático.

L: Longitud del circuito

Nota:

Para todos los circuitos cos φ = 1 y U = 230 V.

La longitud más larga posible es la de 3 módulos a lo largo, es decir 7,2 x 3 = 21,6 m. Por tanto se tomará como el peor caso una longitud de circuito de 22 m.

La unidad terminal (el Fan-coil) estará situado en el módulo del salón, por tanto la longitud del circuito será menor.

c.d.t < 6,9 V (3%).

(*) En el circuito C8 (Fan Coil), al ser la central térmica (bomba de calor) centralizada y alimentada por LGA, la potencia es mucho menor y por consiguiente se puede ignorar la restricción de la sección mínima del circuito). Por tanto, también el interruptor automático, en vez de 25 se substituirá por uno de 16 A.

Tabla 6.42. Características de los circuitos de la vivienda tipo 2 (I). Fuente: Elaboración propia.

Circuito de utilización	S_F (mm ²)	I_{adm} (A)	c.d.t. (V)	S_p (mm ²)	Neutro (mm ²)	Φ_T (mm)	Instalación / Aislamiento
C1 Iluminación	1,5	13	6,11	1,5	1,5	16	A1 - 2xPVC Cu Conductores aislados en un conducto en una pared térmicamente aislada
C2 Tomas de uso general	2,5	17,5	5,87	2,5	2,5	20	
C3 Cocina y horno	6	30	2,60	6	6	25	
C4 Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	4	23	5,73	4	4	20	
C5 Baño, cuarto de cocina	2,5	17,5	7,33	2,5	2,5	20	
C8 Aire acondicionado (*)	1,5	13	6,94	1,5	1,5	25	
C10 Secadora	2,5	17,5	5,87	2,5	2,5	20	

Donde:

S_F : Sección de la fase.

S_N : Sección del neutro.

I_{adm} : Intensidad máxima admisible en el circuito (tabla A.52-1, UNE 20460-5-523:2004).

c.d.t.: Caída de tensión.

S_p : Sección de los conductores de protección.

Φ_T : Diámetro del tubo de conducto de protección.

Tabla 6.43. Características de los circuitos de la vivienda tipo 2 (II). Fuente: Elaboración propia.

Debido a las limitaciones del proyecto, no se han calculado las corrientes de cortocircuito y por consiguiente, no se ha diseñado el sistema de protección.

Canalización para el cableado eléctrico dentro del módulo

La canalización del cableado se realizará mediante bandejas aislantes para las instalaciones eléctricas de PVC, como queda representado en la Figura 6.28. Este sistema de bandeja de cables ofrece una gran versatilidad, seguridad y facilidad de montaje, lo que reduce los costes de instalación.

Ventajas que presentan:

- Protección contra contactos indirectos, no depende de la conexión a tierra ni del correcto funcionamiento del diferencial.
- Se reducen posibles focos de incendio, evita puntos calientes y arcos eléctricos entre los cables y la bandeja.
- No es necesario conectar la bandeja al sistema de tierra: facilita las verificaciones e inspecciones periódicas.

Los empalmes del cableado, pertenecientes al mismo circuito eléctrico, entre módulos se harán en las mismas cajas de derivación.

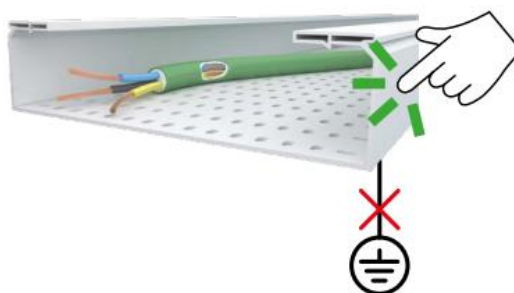


Figura 6.28. Bandeja de PVC aislante de canalización del cableado eléctrico. Fuente: www.unex.net

La canalización irá por el falso techo, de dónde se derivarán y bajarán por dentro del hueco del tabique los cables de cada circuito correspondiente.

Las dimensiones de la bandeja pueden ser tanto 40 mm (altura) x 100 mm (ancho) como 50 x 75 mm, lisas o perforadas.

6.3.3. Generación ACS centralizada

Demanda diaria de ACS por persona

Tanto según el CTE HE4 como el Decreto de Ecoeficiencia, la demanda diaria de ACS de cálculo es 28 l/persona. Mientras que para la Ordenanza de Medio Ambiente Urbano en Barcelona, es de 22 l/persona día. Al ser la establecida por el CTE una demanda mayor, se tomará ésta como valor de cálculo.

Número de personas consumidoras

Se dispone de 2 tipos de vivienda, una de 5 dormitorios y otra de 3.

En el uso residencial privado el cálculo del número de personas por vivienda deberá hacerse utilizando como valores mínimos los que se relacionan a continuación:

- 3 dormitorios: 4 personas
- 5 dormitorios: 6 personas

En los edificios de viviendas multifamiliares se utilizará el factor de centralización correspondiente al número de viviendas del edificio que multiplicará la demanda diaria de agua caliente sanitaria a 60 °C calculada. En este caso, en ser 76 viviendas + 2 locales, el factor de centralización es de 0,75 (CTE-DB-HE 2017).

Contribución solar mínima

Se establece una contribución mínima de energía solar térmica en función de la zona climática y de la demanda de ACS. Barcelona, zona climática II (CTE-DB-HE 2017).

La contribución solar mínima anual es la fracción entre los valores anuales de la energía solar aportada exigida y la demanda energética anual para ACS, obtenidos a partir de los valores mensuales.

En el capítulo 4 de (CTE-DB-HE 2017) se establece, para cada zona climática y diferentes niveles de demanda de ACS a una temperatura de referencia de 60°C, la contribución solar mínima anual exigida para cubrir las necesidades de ACS. En este caso se trataría del 50% mínimo. Mientras que la Ordenanza de Medio Ambiente Urbano en Barcelona establece un mínimo de 60%.

Documento de referencia CTE		
Demanda diaria ACS	28	l/persona*día
3 dormitorios	4	personas
5 dormitorios	6	personas
Contribución mínima anual	60	%
Plantas	19	--
Viviendas/planta	4	--
Locales	2	--
Nº personas	380	--
Demanda diaria ACS edificio	10640	l/día
Factor de centralización	0,75	--
Demanda total diaria	7980	l/día

Tabla 6.44. Datos de partida para el dimensionado de la instalación de ACS. Fuente: Elaboración propia.

Caudales por aparatos e instantáneos

El caudal que se debe asegurar en cada aparato está fijado en el Código Técnico de la Edificación en su documento HS4 “Instalaciones de Salubridad: Suministro de agua” (CTE-DB-HS 2017).

Los caudales instantáneos se obtienen con la suma de los caudales de todos los aparatos del edificio, aplicando un coeficiente de simultaneidad de uso, ya que no todos los aparatos de un mismo edificio se utilizan al mismo tiempo.

Aunque no existe una norma de obligado cumplimiento en la que se indiquen los coeficientes de simultaneidad, pueden utilizarse los datos obtenidos con la aplicación de la Norma UNE 149.201/07, en la cual los caudales instantáneos se tienen con la siguiente expresión, (IDAE 2010):

$$Q_c = A \cdot (Q_T)^B + C$$

Ecuación 6.20

Siendo:

- Q_c : Caudal simultáneo de cálculo (l/s).
- Q_T : Caudal total, suma de todos los aparatos del edificio (l/s).
- A, B y C: Coeficientes que dependen del tipo de edificio, de los caudales totales del edificio y de los caudales máximos por aparatos.

En la Tabla A.III.17 se dan los coeficientes (A, B y C) para cada tipo de edificio.

Donde:

- Q_U : Caudal mayor de los aparatos unitarios (l/s).

Consumos

El consumo de ACS no tiene por qué estar directamente relacionado con el caudal instantáneo, el cual se dará durante periodos muy cortos; para determinar los consumos se aplica el documento HE 4 del CTE, en el que se dan los consumos diarios de ACS a 60 °C, en función del tipo de edificio.

La temperatura de referencia de 60 °C se corresponde con la de acumulación del ACS para prevención de la legionelosis y será la mínima habitual en los sistemas centralizados.

Generación centralizada

- De acumulación: el agua se prepara y acumula previamente en un depósito. Más eficientes. Necesitan menos potencia y mayor ahorro energético.
- Consumos importantes de ACS, constantes o puntas.
- Generación de ACS y acumulación a 60°C.
- Circuito primario cerrado. Nunca se mezcla con el agua del depósito.
- Como mayor capacidad depósito de acumulación menor potencia de caldera.
- El agua fría procedente de la red del edificio entra en el acumulador a presión desplazando el agua caliente hacia los puntos del edificio.
- La caldera mantiene la temperatura del agua del acumulador mediante el agua sobrecalentada que circula por el circuito primario.
- La caldera estará ubicada en la cubierta (debidamente protegida, se creará una sala exclusiva de calderas).

Sistemas con acumulación

La producción de ACS está determinada por el binomio “potencia/capacidad de la acumulación”. La energía útil que proporcione el sistema debe ser capaz de cubrir la demanda en la punta.

Para dimensionar la instalación de producción de ACS debe considerarse que la energía aportada (producción más acumulación) ha de igualar a la consumida en la punta; por ello si los volúmenes de acumulación son menores las potencias deberán ser mayores (sistemas de semiacumulación, o semiinstantáneos) y si los volúmenes de acumulación son mayores las potencias podrán ser inferiores (sistemas de acumulación). Éstos, por lo tanto, son sistemas más eficientes.

El problema fundamental es conocer el caudal punta, tanto en valor como en duración de la

misma, para lo cual no existen datos oficiales publicados ni normas establecidas.

Hay algunos métodos de cálculo que determinan la punta y la duración de la misma, pero todos son métodos empíricos, basados en estimaciones.

Hipótesis conservadoras, que conllevan sistemas que no presentan problemas de funcionamiento, son tomar como consumo en la hora punta el 50% del consumo medio diario en edificios como viviendas.

Problemática en la generación de ACS para los edificios de gran altura

En “Guía Técnica 08. Agua Caliente Sanitaria Central” (IDAE 2010) se expone el siguiente problema, relacionado con la altura del edificio. En las griferías comunes la presión mínima es de 1 bar y la máxima de 5 bar; lo que implica que si el edificio es de gran altura estas presiones no se pueden conseguir en todas las plantas con una distribución única, ya que la presión estática debida a la altura del edificio haría que en las plantas bajas se superasen los márgenes fijados.

Por ello, en edificios de gran altura, habitualmente a partir de unas 8 o 10 plantas, las instalaciones de ACS se deben dividir en zonas; los primarios pueden ser comunes conectados directamente a los colectores de calderas, pero se requieren secundarios (intercambiadores, depósitos, etc.) independientes.

Lo más adecuado antes de diseñar las instalaciones es, con el dato de la presión de suministro, calcular hasta qué planta se puede suministrar directamente con la presión de red, realizando una instalación para esa zona, y dotar de un grupo de presión a las restantes plantas, para lo que se realizará otra distribución independiente; pueden ser necesarios incluso grupos de presión independientes.

En este documento, se ha obviado la problemática expuesta anteriormente dado que se encuentra fuera de las limitaciones del proyecto. Por tanto, todos los cálculos se han realizado bajo la hipótesis de que todas las presiones son suficientes y limitadas a las requeridas en cada planta.

Característica	Valor	Unidades
Producción instantánea		
Caudal instantáneo	3,397	l/s
Consumo ACS (*)	10640	l/día a 60 °C
	14954	l/día a 45 °C
Energía demandada (**)	641,8	kWh/día
Potencia instantánea (**)	595,74	kW
Acumulación 50%		

Característica	Valor	Unidades
Volumen acumulación	3000	l
Potencia caldera	165,66	kW
Tiempo de recuperación	1,71	horas
Acumulación 70%		
Volumen acumulación	3750	l
Potencia caldera	93,63	kW
Tiempo de recuperación	3,02	horas

Nota:

(*) Sin tener en cuenta el factor de centralización de 0,75, marcado por el CTE.

(**) Mismo resultado tanto para 60 °C como 45 °C.

Tabla 6.45. Resultados del dimensionado de la instalación de ACS en función de la producción instantánea y acumulación. Fuente: Elaboración propia.

En los sistemas de acumulación total la potencia de calderas vendrá impuesta por un tiempo preestablecido para calentamiento de los depósitos, del orden de tres o cuatro horas; en el reglamento de 1981 se establecía un tiempo mínimo de 2 horas.

Tramo	Q _c (l/s)	Q _{max} (l/s)	Tubería (mm)	ΔP (Pa/m)	L (m)	ΔP (Pa)
Hasta la planta 20	3,42	4,47	75 x 10,1	500	3	1500
Hasta la planta 19	3,37	4,47	75 x 10,1	500	3	1500
Hasta la planta 18	3,33	4,47	75 x 10,1	500	3	1500
Hasta la planta 17	3,28	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 16	3,23	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 15	3,18	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 14	3,12	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 13	3,06	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 12	3,00	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 11	2,93	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 10	2,86	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 9	2,78	3,32	63 x 8,5	800	3	2400
Hasta la planta 8	2,70	3,32	63 x 8,5	500	3	1500
Hasta la planta 7	2,60	3,32	63 x 8,5	500	3	1500
Hasta la planta 6	2,50	3,32	63 x 8,5	500	3	1500
Hasta la planta 5	2,29	3,32	63 x 8,5	400	3	1200
Hasta la planta 4	2,06	2,08	50 x 6,8	900	3	2700
Hasta la planta 3	1,79	2,08	50 x 6,8	700	3	2100
Hasta la planta 2	1,47	2,08	50 x 6,8	500	3	1500
Hasta la planta 1	1,04	1,34	40 x 5,4	800	3	2400
Conexión viviendas	0,49	0,52	25 x 3,4	2000	6	12000
Perdidas de carga de tuberías distribución general						52500

Nota:

V = 2 m/s

Tubería: Diámetro exterior x espesor pared.

L: longitud tramo tubería.

ΔP: Perdida de carga en el tramo.

Tabla 6.46. Caudales y cargas en el conducto de ACS según planta y conexión vivienda. Fuente: Elaboración propia.

Canalización para el Agua Fría Sanitaria y Agua Caliente Sanitaria dentro del módulo

La distribución tanto de AFS como ACS se realizará mediante tuberías termoplásticas de Polietileno reticulado (PE-X), UNE-EN ISO 15875, una solución muy utilizada actualmente. Son más manipulables, permiten ejecución empotrada o enterrada. Se colocan en bandejas si se tienen tiradas largas. Por contra son menos resistentes.

- Destinados a usos sanitarios.
- Mismas aplicaciones que el Cu.
- Resistente a la corrosión.
- Baja rugosidad.
- Transporte de agua a presión.
- Ligeros.
- Admiten gran variedad de sistemas de unión. (Soldadura, mediante accesorios mecánicos, bridas o por juntas elásticas).

Todas las tuberías de ejecución vista enfundan con espuma elastomérica (Armaflex) para evitar condensaciones, espesores de 6, 9 o 12 mm.

La resistencia a la temperatura de trabajo se define por la clase que se tiene en las diversas normas de cada tipo de tubería, para ACS a 70 °C los mismos deben ser clase 2.

Clase	Campo aplicación típico	T _D (°C)	Años	T _{MAX} (°C)	Años	T _{MAL} (°C)	Horas
2	ACS a 70 °C	70	49	80	1	95	100

Tabla 6.47. Características del conducto de PE-X. Fuente: (IDAE 2010).

La clase 2 es una tubería que puede trabajar permanentemente a 70 °C, que periódicamente puede alcanzar los 80 °C y esporádicamente pueden alcanzar incluso 95 °C y la tubería seguiría resistiendo con una esperanza de vida al menos de 50 años.

Todas las tuberías que discurran por las viviendas (módulos), sin excepción al uso destinado del módulo,) serán de diámetro nominal DN de 20 mm, de acuerdo al capítulo 4 del (CTE-DB-HS 2017).

El empalme de las tuberías entre módulos se hará mediante la electrosoldadura, que permite un montaje rápido y limpio de diferentes tramos de tubería.

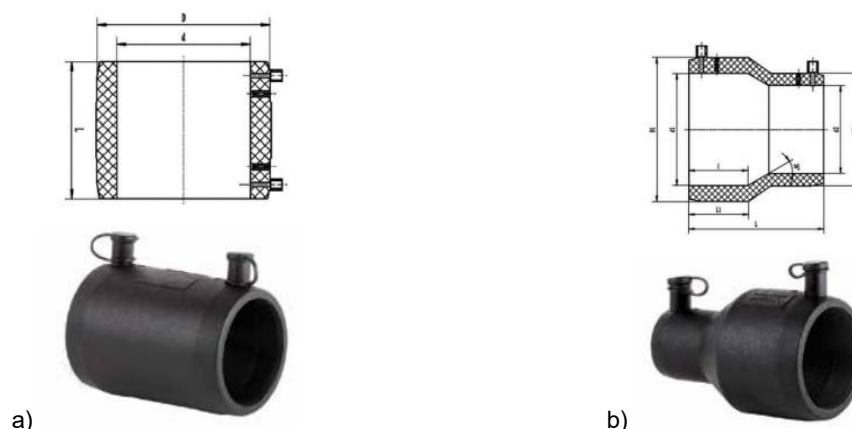


Figura 6.29. a) Manguito D1-D1 electrosoldable PE. b) Reductor D1-D2 electrosoldable PE. Fuente: www.egbgroupp.com

Caldera de biomasa

Las calderas de biomasa son sistemas eficientes de producción agua caliente sanitaria. Funciona con combustibles basados en desechos naturales, incluso con basura orgánica. Los combustibles empleados más reconocidos son el pellet, la leña y en algunas zonas geográficas el hueso de aceituna.

La combustión de estos materiales es capaz de producir energía térmica y eléctrica para abastecer las necesidades domésticas. También existen sistemas de calefacción centralizada con biomasa que son utilizadas para suministrar calefacción a todas las viviendas de un edificio.

Ventajas de las calderas de biomasa, (Inarquia 2019):

- Es una fuente de energía inagotable.
- Produce niveles muy bajos de contaminación ambiental, además de considerarse como energía renovable de emisión de gases de CO₂ iguales a 0.
- Ayuda a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.
- Buen sistema para reutilizar los residuos industriales, en caso de las instalaciones en la industria.
- Tiene una eficiencia energética superior a las calderas tradicionales como son las de gas y gasoil.
- Complementariedad con otros sistemas de ACS, como por ejemplo los paneles solares térmicos.

Desventajas de las calderas de biomasa, (Inarquia 2019):

- La caldera ofrece unos rendimientos menores que los ofrecidos por los combustibles fósiles.
- El material combustible tiene una menor densidad energética lo que incrementará el tamaño de los espacios de almacenamiento.
- Los costes de instalación son mayores. Esto es relativo, debido a que al ser mucho más reducidos los costes del combustible en relación con el gas o el gasoil, la operación se amortiza en poco tiempo y comenzará a ser rentable, y reducir gastos.
- Pueden requerirse tratamientos de secado de los combustibles de biomasa debidos a los diferentes grados de humedad.

Caldera de biomasa de pellets		
Característica	Valor	Unidades
Fabricante	Hargassner	--
Modelo	Eco-PK 100	--
Rango de potencia	33-99	kW
Eficiencia carga máx./parcial	93,6/95,4	%
Acometida eléctrica	230/50/13	V (AC) / Hz / A
Capacidad calorífica a carga máxima	105	kW
Diámetro del tubo de extracción	180	mm
Capacidad de agua	180	l
Rango de temperatura	75-78	°C
Necesidad elevación temp. retorno	58	°C
Pérdida de carga ΔT 10/20 [K]	112,9/28,9	mbar
Impulsión/retorno	6/4"	Pulgadas
Peso	890	kg
Dimensiones	2200/1335/ 745	mm

Tabla 6.48. Características de la caldera de biomasa.

El siguiente cuadro muestra las diferencias de coste por kW entre los diversos combustibles para calefacción, teniendo como referencia el coste por kW de la leña (véase la Figura 6.30). De esta forma, se puede comprobar fácilmente el ahorro que se obtiene al utilizar biomasa (leña o pellet) frente a las demás formas de combustible para calefacción.

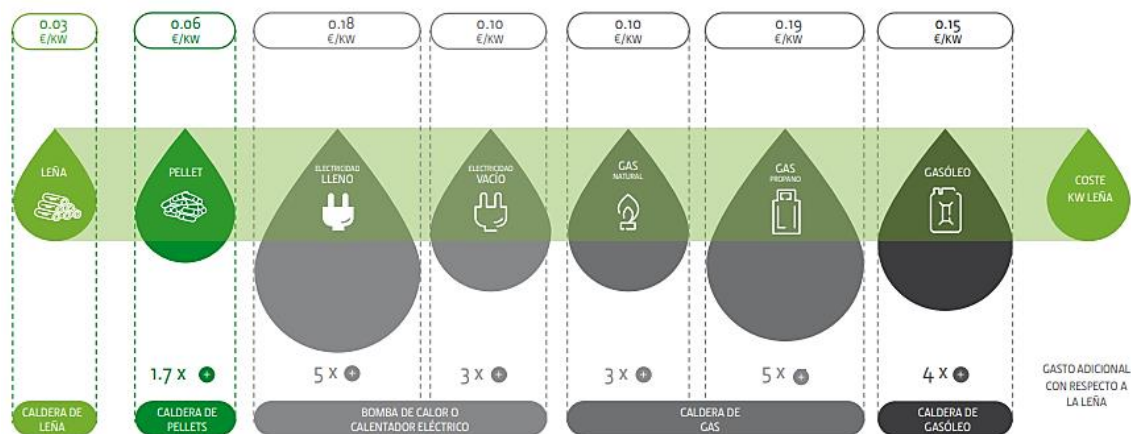


Figura 6.30. Comparación de costes de combustible para calderas. Fuente:(Solzaima 2017)

6.3.4. Generación ACS termosolar

Integración de la energía solar térmica

Con la entrada en vigor del CTE todos los edificios de nueva construcción que consuman ACS dispondrán, salvo algunas excepciones debidamente justificadas, de instalaciones para calentamiento de agua con energía solar térmica, que deben integrarse en las instalaciones térmicas del edificio; la energía solar proporcionará un porcentaje del consumo de ACS, siendo la instalación térmica tradicional la que deba llevar el agua, cuando las aportaciones solares no sean suficientes, hasta las condiciones de uso.

La fracción solar mínima depende de la zona de ubicación del edificio y del consumo diario de ACS, debiendo ser más alta en las localidades con mayor radiación solar incidente y en los edificios con mayor consumo; al margen de ello la instalación solar enviará a la instalación tradicional agua cuya temperatura puede variar desde la del agua de la red, en las épocas en las que no haya aportaciones solares, hasta temperaturas incluso superiores a las necesarias para consumo.

En instalaciones centrales la integración de las instalaciones solares es relativamente sencilla, con la diferencia de que al sistema de producción de ACS en lugar de llegarle agua de la red se le suministrará el agua proveniente de la instalación solar.

Para poder alcanzar aportaciones solares altas es conveniente que la acumulación tradicional tenga el menor volumen posible, compatible con las necesidades de consumo, destinando las mayores acumulaciones a la energía solar, (IDAE 2010).

Para disponer de una potencia de intercambio alta, con acumulaciones menores, lo más adecuado es que las instalaciones tradicionales se realicen con depósitos e intercambiadores externos de placas, que se pueden dimensionar para altas potencias; si se optase por interacumuladores para obtener las superficies de intercambio necesarias se deben incrementar los depósitos, lo que obliga a atender a un mayor volumen con las calderas, reduciendo las posibilidades de aportación solar, (IDAE 2010).

Los aspectos a cuidar en la integración son:

Conexión entre la instalación solar y la instalación tradicional, que salvo muy contadas excepciones será en serie, de manera que la instalación solar aporta un agua precalentada.

Tratamiento antilegionela; en el RD 865/2003 se especifica que cuando se disponga de una instalación de recuperación de calor, entre las que clasifica las de energía solar térmica, el agua antes de ser enviada a consumo experimentará un calentamiento con una temperatura mínima de 60 °C, esto se llevará a efecto en el depósito calentado por calderas; además el

diseño se realizará de modo que con la periodicidad que se determine los depósitos solares alcancen los 70 °C; para ello se pueden emplear las calderas, lo que afectará al diseño hidráulico de la conexión entre ambas instalaciones, (IDAE 2010).

Se entiende como fracción solar o grado de cobertura solar anual el porcentaje que representa la producción energética anual de una instalación solar sobre la demanda anual del edificio.

Es importante tener en cuenta que a medida que aumenta la fracción solar anual, la temperatura media de funcionamiento del captador aumenta y, por tanto, su rendimiento disminuye. En consecuencia, la fracción solar anual no aumenta linealmente con la superficie de captación, (Lara 2015).

La productividad energética de los captadores solares, expresada en kWh/(m²·año), disminuye a medida que aumenta la fracción solar anual. Una instalación con una superficie de captación pequeña proporcionará una fracción solar anual baja, pero la productividad por unidad de superficie será elevada.

La estimación de la producción energética de una instalación de calentamiento de agua mediante energía solar es un procedimiento en el que intervienen múltiples factores, algunos de los cuales son variables en el tiempo (temperaturas, radiación solar, caudales, etc.).

En el Anexo III Instalaciones – cálculo ACS termosolar se expone el procedimiento seguida para la determinación de la fracción solar o grado de cobertura de una instalación solar de producción de agua caliente sanitaria basado en el procedimiento de las curvas f (f-Chart), válido tanto para edificaciones multifamiliares como para viviendas unifamiliares. Metodología seguida de acuerdo a la indicada en (Lara 2015).

Determinación de la fracción energética mensual f aportada por el sistema de captación solar

Una vez determinados los valores mensuales de los parámetros D1 y D2, se puede calcular la fracción solar mensual a partir de la expresión mencionada anteriormente.

$$F = 1,029D_1 - 0,065D_2 - 0,245D_1^2 + 0,0018D_2^2 + 0,0215D_1^3$$

Ecuación 6.21

La energía útil mensual EU_{mes} aportada por la instalación solar para la producción del agua caliente sanitaria del edificio viene determinada por la siguiente expresión:

$$EU_{mes} = f \cdot DE_{mes}$$

Ecuación 6.22

Siendo:

- EU_{mes} : la energía útil mensual captada en kWh/mes.
- f : la fracción solar mensual.
- DE_{mes} : la demanda energética en kWh/mes.

La fracción solar anual F que la superficie de captadores Sc nos proporcionará será:

$$F = \frac{\sum_1^{12} EU_{mes}}{\sum_1^{12} DE_{mes}}$$

Ecuación 6.23

Mes	DE_{mes} (kWh/mes)	D1	D2	f	EU_{mes} (kWh/mes)	F
Enero	14921,96	0,549	2,970	0,318	4742,67	31,8%
Febrero	13218,71	0,764	3,078	0,470	6207,31	47,0%
Marzo	14061,08	0,986	3,309	0,602	8460,94	60,2%
Abril	13052,09	1,164	3,477	0,695	9077,69	69,5%
Mayo	13200,20	1,273	3,440	0,755	9963,77	75,5%
Junio	12496,68	1,376	3,315	0,812	10153,39	81,2%
Julio	12626,28	1,544	3,361	0,886	11184,66	88,6%
Agosto	12913,24	1,381	3,143	0,824	10638,75	82,4%
Septiembre	12774,38	1,232	3,103	0,752	9600,68	75,2%
Octubre	13487,16	1,008	3,312	0,615	8288,26	61,5%
Noviembre	13607,50	0,696	3,230	0,413	5624,47	41,3%
Diciembre	14921,96	0,521	2,895	0,299	4465,31	29,9%
ANUAL	161281,23	--	--	--	98407,90	61,0%

Tabla 6.49. Resultado del cálculo de fracción solar mensual y anual. Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la superficie de captación solar

En el caso de que la fracción solar anual obtenida no sea satisfactoria, los cálculos se deberán repetir hasta obtener una superficie de captación Sc que satisfaga la condición establecida.

La superficie de captación definitiva será aquella que permita obtener la fracción solar anual deseada y que se pueda obtener con un número entero de captadores solares, cuya superficie

unitaria depende del modelo seleccionado.

- Así que según estos parámetros se encontrará iterativamente la fracción solar deseada.
- Sistema de acumulación solar: El cálculo del volumen recomendado resulta 7000 litros.
- Ninguno de los meses el sistema solar cubre el 110% de la demanda energética ni en 3 meses seguidos cubre un 100%. Según el CTE.
- El rendimiento anual es mayor del 61%.

Pérdidas por sombras

Los captadores deberán separarse suficientemente de los obstáculos próximos que puedan proyectar sombras sobre ellos (muretes, chimeneas de ventilación, otras filas de captadores).

Como criterio general, la distancia mínima de separación d debe ser suficiente para que el obstáculo no proyecte sombras sobre el captador al mediodía solar del solsticio de invierno, que es el día en el que la altura solar es menor y, por tanto, las sombras son de mayor longitud.

El valor de la distancia d (En caso de existir una Ordenanza Solar se debe considerar si ésta impone, o recomienda, otro método de cálculo diferente al aquí indicado), medida sobre la horizontal, puede calcularse de forma sencilla mediante la siguiente expresión:

$$d = h \cdot k$$

Ecuación 6.24

Dónde:

- Dimensiones captador: 2152 × 1252 × 80 mm.
- d la distancia de separación entre obstáculo y captador, en metros.
- h la altura del obstáculo, en metros.
- $k = 1 / \tan (67^\circ - \text{latitud}) = 2,05$

Por lo que las pérdidas por sombras serán 0.

Dado que hay varias filas de captadores, la distancia mínima entre las bases de captadores será igual o mayor al valor obtenido mediante la expresión siguiente:

$$d = d + L \cdot \cos \beta$$

Ecuación 6.25

Siendo:

- d: distancia mínima entre la parte superior de una batería de captadores y la parte inferior de la siguiente.
- L: longitud del captador.
- B: ángulo de inclinación del captador.

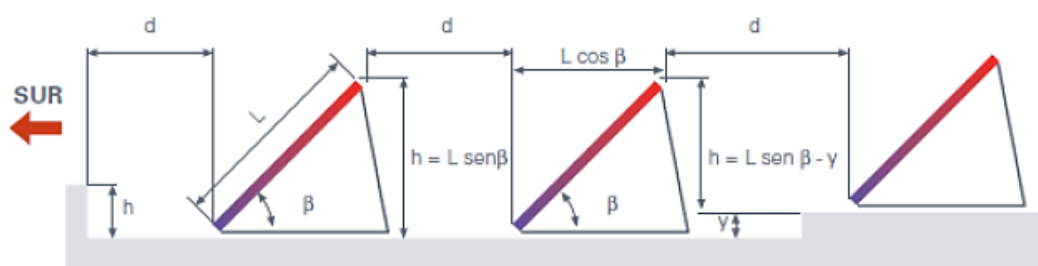


Figura 6.31. Esquema para el cálculo de la distancia de separación entre filas de captadores.
Fuente: , (Lara 2015)

La distancia entre filas de captadores sería de $d = 2,5$ m.

La estimación de las pérdidas de radiación solar que eventualmente puede experimentar una superficie de captación debido al efecto de las sombras proyectadas por edificios circundantes se podrá realizar siguiendo el procedimiento establecido en el documento Pliego de Condiciones extraído de “Instalaciones de Energía Solar Térmica. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones a Baja Temperatura” de IDAE (Anexo VI. Cálculo de pérdidas de radiación solar por sombras), (Lara 2015).

En ese caso, la energía solar incidente sobre los captadores a utilizar en el método f - Chart se calculará teniendo en cuenta el coeficiente p_{som} aplicado a la siguiente expresión:

$$EL_{mes} = K_{mes} \cdot H_{día} \cdot N \cdot (1 - p_{or}) \cdot (1 - p_{som})$$

Ecuación 6.26

Siendo p_{som} coeficiente de pérdidas por proyección de sombras edificaciones adyacentes.

Conexión de captadores

Para la producción de ACS, lo más adecuado es disponer los captadores conectados en paralelo, formando filas que a su vez se conectan entre sí también en paralelo.

El número de captadores que pueden conectarse en paralelo en un mismo grupo depende de las características constructivas del captador y es una información que debe ser suministrada por el fabricante. En general, se desaconseja la conexión de más de 8 captadores solares en un mismo grupo. Si se supera este número, es posible que el caudal no se reparta homogéneamente por todos los captadores y, por tanto, se penalice la productividad energética del conjunto.

Los captadores se dispondrán en filas con igual número de unidades, debiendo ser éstas paralelas, horizontales y bien alineadas.

Deberán instalarse válvulas de corte en la entrada y salida de los distintos grupos. Asimismo, se debe prestar especial atención en la estanqueidad y durabilidad de las conexiones del captador y en asegurar que el circuito hidráulico de conexión entre los diferentes grupos esté equilibrado, es decir, que no existan recorridos preferentes que puedan originar que algunos grupos de captadores no reciban el caudal suficiente de fluido caloportador para su correcto funcionamiento.

Caudal del circuito primario

El caudal del circuito primario de captadores se establece en un valor próximo a 50 litros/h por m² de captación solar (El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios establece que el caudal de circulación “estará comprendido entre 1,2 l/s y 1,6 l/s por cada 100 m² de área de captadores” lo que corresponde a 43,2 litros/(h·m²) y 57,6 litros/(h·m²), respectivamente), para captadores solares conectados en paralelo. Con este caudal se asegura una correcta extracción de la energía captada y con valores superiores no se logran aumentos significativos de la producción solar.

En cualquier caso, es aconsejable tener en cuenta las indicaciones del fabricante acerca del caudal recomendado para su captador. En función de éste se calcula el caudal que circula por una batería de captadores en paralelo, como la suma de los caudales que circulan por cada uno de los captadores.

$$Q = Q_{captador} \cdot S_c \cdot N$$

Ecuación 6.27

Siendo:

- Q: caudal total del circuito primario, en litros/hora.
- Q_{captador} : caudal unitario del captador en litros/(h·m²) (Indicado fabricante o en su defecto 50 litros/(h·m²)).
- Sc: superficie de un captador solar, en m².
- N: número de captadores.

Para el captador CTE 220 CH 2 con una superficie de captación de 2,52 m² y considerando un caudal del captador de 50 litros a la hora por m², y sabiendo que se tienen 62 captadores, el caudal total del circuito primario en litros por hora $Q = 7817$ l/h.

6.3.5. Diseño del paso de las instalaciones

A partir de los resultados obtenidos en los apartados anteriores, ya se conocen las dimensiones y los materiales de los conductos de las instalaciones. Por lo tanto, ya se puede trazar el paso de éstos por toda la planta. Dado que la distribución de las viviendas es simétrica, y con ello también lo es la distribución de los módulos que las forman, únicamente se representa el trazado de la vivienda tipo 2, la mayor de las dos.

En la Figura 6.32 y Figura 6.33 quedan representadas 5 canalizaciones; climatización (conducto de impulsión), conducto de extracción, tuberías de ACS y AFS, y por último, canalización del cableado eléctrico. Como ya se vino diciendo, estas canalizaciones discurrirán por el falso techo, aunque también pueden ir a la vista, como es el caso de las tuberías. En el caso del cableado eléctrico, éstos una vez llegados al punto de toma, bajaran por dentro de los tabiques. A lo que se refiere a las instalaciones de telecomunicaciones, éstos no fueron objeto de estudio, pero compartirían el mismo sistema de distribución y canalización que el cableado eléctrico.

Por último, en este documento no se aportan unos planos de las instalaciones más detallados, ya que, para ello, se precisaría un estudio más profundo y por tanto, queda fuera de las limitaciones del proyecto.

Conductos de admisión	Dimensión (cm)	Material
Estancias	Vivienda tipo 1 / tipo 2	
Conexión con Fan-Coil	20,0 x 7,0	Lana de Vidrio reforzada
Salón	9,0 x 5,0 / 5,0 x 5,0	
Dormitorio doble	4,0 x 5,0	
Dormitorio simple	2,0 x 5,0	
Conductos de extracción	Dimensión (cm)	Material
Estancias	Vivienda tipo 1 y 2	
Baños	5,0 x 5,0	Lana de Vidrio reforzada
Cocina	7,5 x 5,0	
Bandeja de cableado eléctrico	Dimensión (cm)	Material
Estancias	Vivienda tipo 1 y 2	
Todas	5,0 x 7,5	PVC
Tuberías	DN (mm)	Material
Estancias	Vivienda tipo 1 y 2	
Todas	20	PE-X + Armaflex

Tabla 6.50. Resumen de los conductos de las instalaciones. Fuente: Elaboración propia.

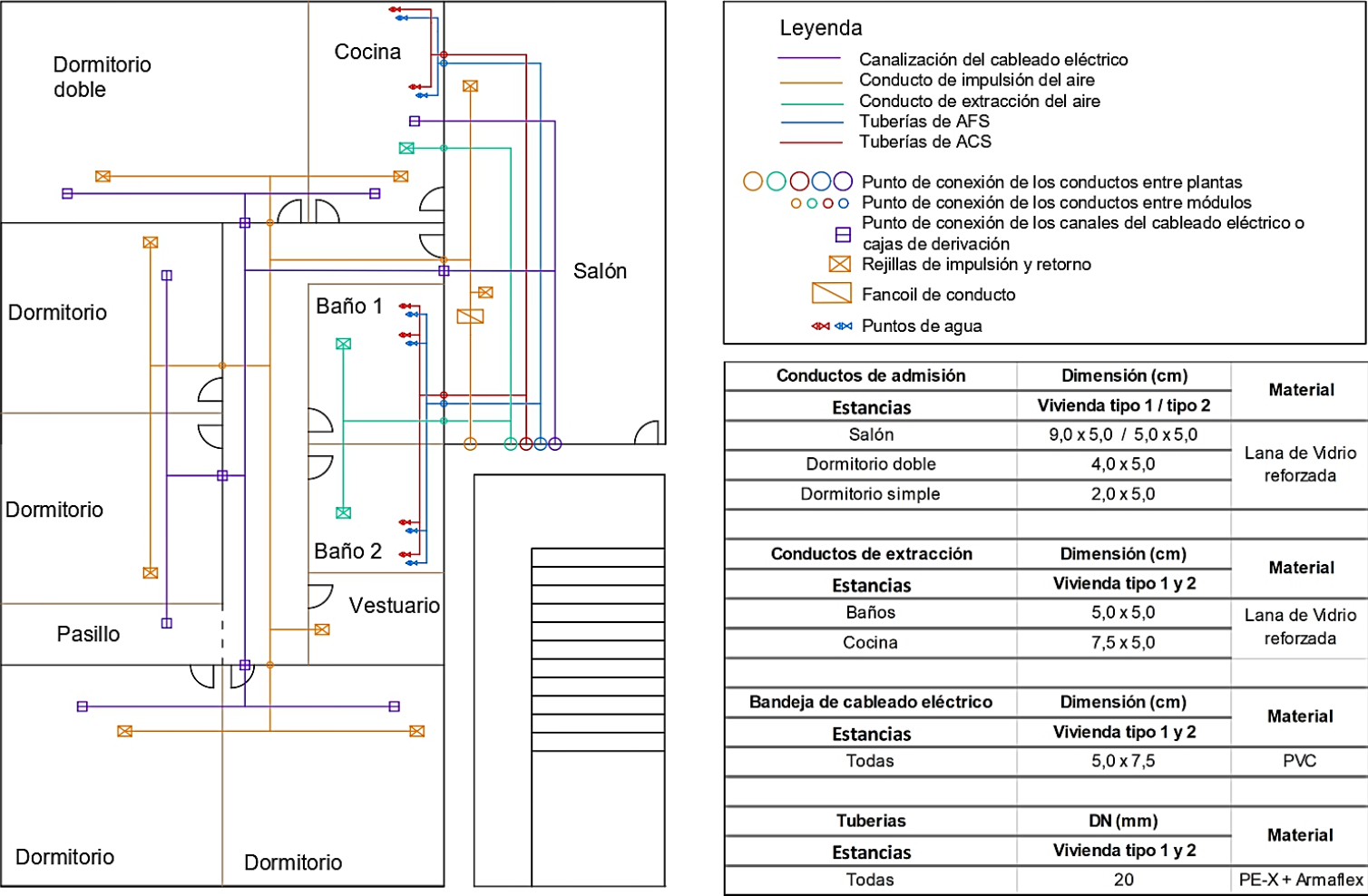


Figura 6.32. Plano del paso de las instalaciones en la vivienda tipo 2. Fuente: Elaboración propia.

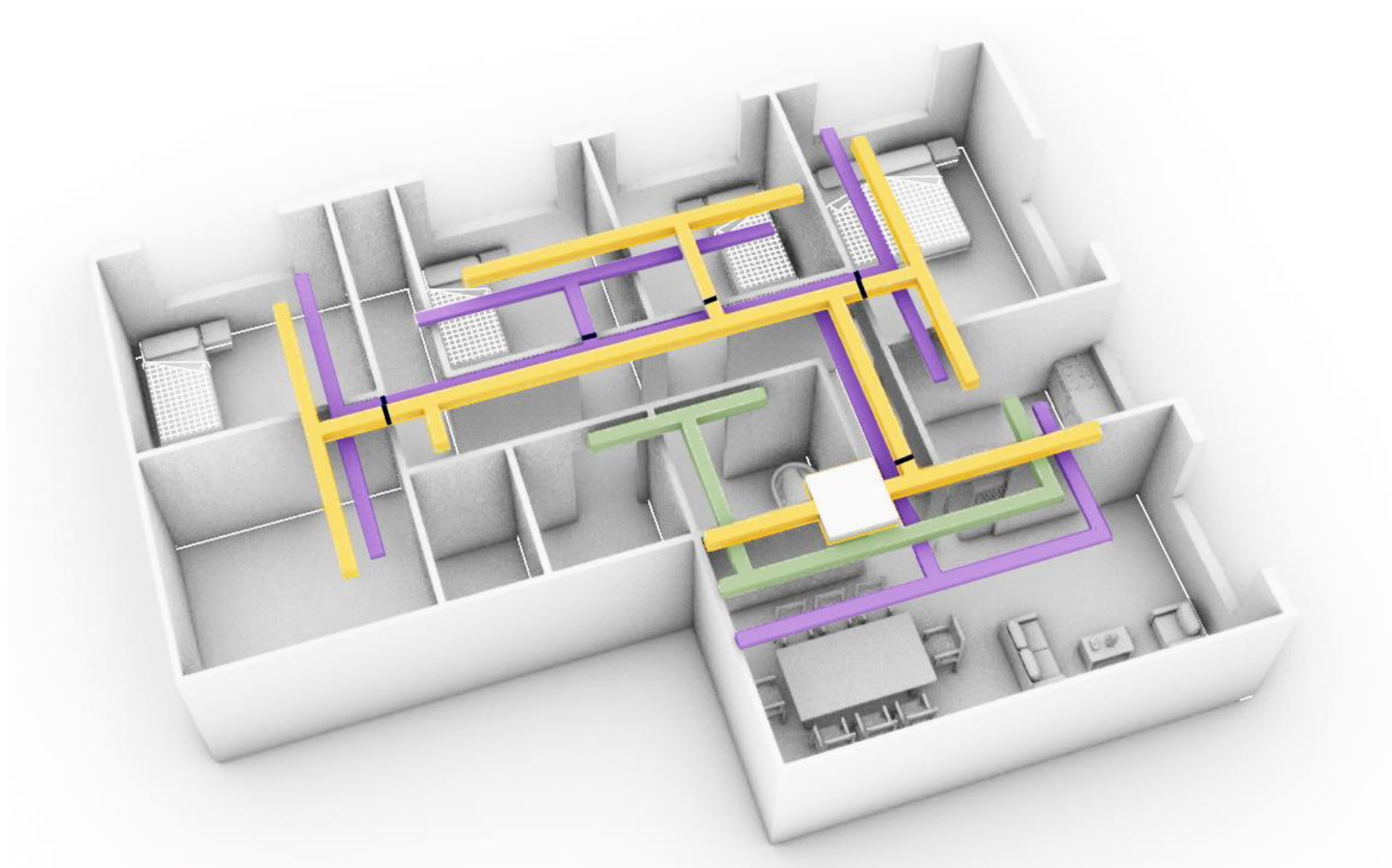


Figura 6.33. Render del paso de las instalaciones en la vivienda tipo 2. Fuente: Eva Serrano.

6.4. Transporte

Según la Dirección General de Tráfico (DGT) la anchura máxima autorizada para la circulación de vehículos pesados, como regla general es de 2,55 m. El artículo 14 del Reglamento General de Vehículos determina que no se permitirá la circulación de vehículos que superen estas dimensiones. No obstante, en su apartado 2 permite que el órgano competente en materia de tráfico pueda conceder autorizaciones especiales y por un número limitado de circulaciones o por un plazo determinado. Para ello es necesario un previo informe vinculante del titular de la vía, para los vehículos que, por sus características técnicas o por carga indivisible que transportan, superen las masas y dimensiones permitidas y una previa comprobación de que se encuentran amparados por la autorización de transporte legamente procedente, (Dirección General de Tráfico 2008).

Según las instrucciones para emitir estas autorizaciones especiales a los que hace referencia el artículo 108.3 del reglamento general de carreteras, el transporte por carretera de estos módulos se catalogaría como transporte especial genérico y no sería necesario aportar además un estudio específico, al no superar las siguientes dimensiones: anchura de 5,55 m, longitud 45,00 m, altura 4,70 m, masa máxima 100 toneladas, masa por eje igual o inferior. En este caso se considerará favorablemente informado con carácter general, y no será por tanto necesario que por el Organismo autorizante se solicite de la Dirección General de Carreteras la emisión de informe individualizado, la autorización de circulación por la red de carreteras de los vehículos que no superen las masas y dimensiones indicadas anteriormente. (*Art. 108.3 del Real Decreto 1812/1994 de 2 de septiembre, Nota de Servicio 2/2016*), (Ministerio de Fomento 2016). Por consiguiente, los módulos de dimensiones, 7,2 x 3,6 x 3 m y de 5,5 toneladas cada uno, podrán ser transportados sin mayores problemas.

En cuanto a las normativas de tráfico, en todo caso será preciso que una vez obtenida autorización, el titular de la misma comunique, con antelación suficiente, el itinerario del transporte y sus características a las Unidades de Carreteras afectadas para informarse acerca de eventuales restricciones por obras, emergencias u otras medidas excepcionales en materia de vialidad y seguridad vial que puedan afectarle. (*Art. 108.3 del Real Decreto 1812/1994 de 2 de septiembre, Nota de Servicio 2/2016*), (Ministerio de Fomento 2016).

El Reglamento CEPE/ONU 48R, establece disponer de la Señal V-23 distintivo de vehículos de transporte de mercancías para señalizar vehículos largos y pesados, así como sus remolques, tanto en la parte trasera como en el lateral del mismo, en función de las masas máxima, longitudes y categorías. Cuando la carga sobresalga longitudinalmente por toda la anchura de la parte posterior del vehículo deberá colocarse la señal V-20 (panel de cargas que sobresalen) utilizando dos paneles de señalización formando geométricamente una “v”

invertida, cada uno en un extremo de la carga o de la anchura del material que sobresalga. Si circula entre la puesta y la salida del sol o bajo condiciones meteorológicas o ambientales que disminuyan sensiblemente la sensibilidad, la carga que sobresalga por la parte posterior debe ir señalizada además, con una luz roja. Las cargas que sobresalgan lateralmente del gálibo del vehículo, de tal manera que su extremidad lateral se encuentra a más de 0,40 m del borde exterior de la luz delantera o trasera de posición del vehículo, deberán estar señalizadas en cada extremidad lateral, hacia delante con una luz blanca o dispositivo reflectante blanco, y hacia atrás, por una luz roja o dispositivo reflectante rojo.

Los conjuntos de vehículos cuya longitud exceda de 12 metro están obligados a llevar en su parte posterior y centrada respecto al eje del remolque o semirremolque la señal V-6, consistente en una placa o placas de color amarillo reflectante y borde rojo fluorescente, (Dirección General de Tráfico 2008).

Para satisfacer la necesidad de transporte del módulo del estudio, son necesarios camiones con plataformas tipo góndola o en “cuello de cisne” ya que disponemos de una altura de 3 m, planas para la carga de los módulos, mínimo 2 ejes adicionales por el peso que se está transportando y con dirección en las ruedas para facilitar la maniobrabilidad. Existen flotas que permiten el transporte de 3 o incluso 4 módulos a la vez, colocados longitudinalmente.

Debido al tamaño de los vehículos, para no alterar excesivamente el tráfico y una mayor fluidez, se recomienda realizar el transporte durante las horas nocturnas.

6.5. Proceso constructivo

La construcción de un edificio de gran altura mediante módulos PPVC (Construcción Volumétrica Prefabricada y Prefinalizada) de acero empieza en el taller o talleres dónde éstos se vayan a montar.

El módulo PPVC se compone de 3 partes fundamentales: estructura o esqueleto de acero, revestimiento e instalaciones, obviando los acabados. Todas estas partes serán montadas en el taller, para ello lo primero que se tiene que hacer es adquirir los materiales y componentes correspondientes.

Estructura del módulo

Se adquieren los perfiles correspondientes: pilares SHS 200x200 mm (de sus siglas en inglés, Square Hollow Section, es decir secciones cuadradas huecas) de 15 mm de espesor, de 3 metros de longitud y de acero S355. Se adquieren las vigas HEM 200, también de acero S355, de 7,2 metros y 3,6 metros de longitud al proveedor correspondiente. En total, se necesitarán 4 pilares, 4 vigas de 7,2 metros de longitud y 4 vigas de 3,6 metros por cada módulo que se vaya a construir.

Una vez adquiridos los perfiles se procede a su unión y el conformado del módulo. Todas las uniones pilar – viga se realizan mediante soldadura a tope para garantizar completa rigidez. Para ello, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Se tiene que observar las reglas de buena práctica,
- Las características mecánico – resistentes del metal de aportación son como mínimo, iguales a las del metal base (S355),
- Además, se tiene que evitar, mediante la oportuna elección del material y de los detalles constructivos adecuados, el peligro de rotura frágil.

Con lo cual, una vez montada la caja, el resultado ha de dar un cubículo de 7,2 x 3,6 x 3 m (dimensiones de eje a eje de los perfiles).

Revestimiento

El siguiente paso es la adquisición de los materiales y sistemas constructivos para el revestimiento del módulo. En el apartado 6.1.4 Cerramientos, de este documento se propuso una solución para cada tipo de cerramiento, pero esto no implica que sea una solución única,

por ejemplo, en el apartado 4.3.3 de este documento se exponen los revestimientos de fachada prefabricada de GRC, solución totalmente válida para estos módulos.

Una vez adquiridos todos los componentes de los diferentes proveedores, en el mismo taller los operarios calificados tienen que llevar a cabo el montaje del sistema, siguiendo las instrucciones de montaje disponibles, las indicaciones del DAU (si se dispone de uno) o subcontratando los servicios de la empresa proveedora de la solución a implementar. Es importante remarcar que, dependiendo de la solución escogida, la empresa proveedora puede no garantizar ni hacerse responsable del correcto funcionamiento del sistema constructivo si los operarios que lo vayan a montar no son instruidos y por tanto reconocidos por la misma empresa.

Instalaciones

La siguiente acción que llevar a cabo es el montaje de las instalaciones. Esto conlleva a instalar los conductos y las canalizaciones que discurrirán por el falso techo de cada uno de los módulos, hasta llegar a sus puntos de empalme o conexión con otros módulos o, también, hasta sus correspondientes puntos terminales. En caso del cableado eléctrico, que principalmente será conducido como toda la demás canalización, por dentro del falso techo, los cables también se discurrirán por dentro de los tabiques hasta los puntos de enchufe.

Se tienen que seguir las indicaciones y el plano adjunto Figura 6.32 del apartado 6.3.5 donde se expone el recorrido de cada una de las instalaciones (tratadas en este documento). Es importante remarcar, que no todos los módulos, aparentemente idénticos, tendrán el mismo recorrido de las instalaciones. De hecho, este punto es el que más hace diferir un módulo del otro y el que más relevancia tiene, salvando las distancias, ya que un montaje incorrecto, imposibilitará las conexiones intermodulares de los canales y conductos de las instalaciones, lo cual puede dejar sin servicio toda la vivienda, planta o incluso el edificio. El módulo central, por dónde pasarán todas las canalizaciones, será el módulos del salón.

Como pasa con la estructura del módulo y el revestimiento, se tienen que adquirir los materiales y componentes correspondientes para cada tipo de instalación. El montaje se llevará a cabo en el taller o fábrica y siempre por un personal especializado.

Mientras estos módulos se fabrican en serie en el taller, se inicia el procedimiento de la cimentación.

Cimentación

Tal como se expuso en este documento, la cimentación que se llevará acabo, para este

edificio, será mediante la cimentación superficial por losa o placa de hormigón. Para ello, primeramente, se tienen que llevar a cabo la excavación y el movimiento de tierras correspondientes, para una posterior colocación de la losa, de siguientes dimensiones totales 28,8 x 25,2 x 1,5 metros (o 2,5 metros para evitar la fisuración el hormigón) expuestos en el apartado 6.2.3 de este documento. Las características del hormigón y el armado serán las indicadas en el apartado 6.2.4.

Antes del llenado completo del hormigón, se tienen que colocar los anclajes para las basas de soporte, especificados en el apartado 6.1.3 y para los pilares del núcleo. Estos anclajes se colocarán en los puntos de apoyo de los pilares de los módulos de la primera planta, tal como viene indicado en la Figura A.I.1 de los Anexos I Estructural – Cálculo de cimentación, y por tanto, servirán de replanteo.

Núcleo

Como ya se comentó varias veces a lo largo de este documento, en la construcción modular de gran altura es imprescindible un núcleo resistente, en este caso es de acero también. Una vez realizada la cimentación el siguiente paso es la colocación de los perfiles del núcleo: pilares HEB 300, vigas HEB 240 y diagonales HEB 140, todas de acero S355, como se expone en el apartado 6.2.

El suministro de los perfiles se hará en camiones no especiales, de una longitud total suficiente para permitir el transporte de pilares de 10 metros de longitud. Al ser todos estos de la misma sección, se puede acortar la longitud de cada pilar, ya que no habrá problemas a la hora de montarlos, y por tanto, se podrá proceder con el montaje a medida que vayan llegando. En el caso de que se vaya a realizar el montaje del núcleo mediante perfiles de más de 15 metros se tendrán que seguir las indicaciones expuestas en el apartado 6.4 Transporte de este documento.

Mediante una grúa, se irán acoplando los pilares a la cimentación, esta unión ha de ser totalmente rígida y que simule un empotramiento. Por tanto, se tiene que disponer de un número de anclajes suficiente, una placa de apoyo de espesor adecuado y de una base rigidizada, para resistir las grandes cargas laterales debido a la altura del edificio.

Una vez que se hayan colocado los primeros pilares del núcleo, alrededor se montarán andamios, tal que los operarios puedan ir realizando los acoplamientos y las uniones entre los demás perfiles, vigas y diagonales, a medida que se van instalando las escaleras, también metálicas. Es importante que en todo momento se tienen que seguir las obligaciones y recomendaciones de seguridad en la obra.

Acoplamiento de los módulos

El transporte de los módulos a la obra se hará en transporte especial, en ser los módulos de un ancho de 3,6 metros. Todos los módulos tendrán que ir debidamente fijados, según la reglamentación de tráfico, y protegidos durante el trayecto para evitar los daños y desperfectos. Una vez los módulos hayan llegado a la obra, se tendrán que almacenar en una zona cercana y accesible para la grúa, que los va a izar. No se podrá apilar más de dos módulos, en caso contrario, se tendrán que tomar medidas para la fijación de éstos.

Los módulos que formarán la primera planta del edificio tendrán que dejar una banda, de unos 15 cm, a lo largo de todo el perímetro del módulo, sin revestir. Esto es necesario para que el operario tenga visión suficiente, cuando vaya a acoplar los primeros módulos a la espiga prismática sobresaliente de la placa de asiento, fijada con antelación a la losa mediante los anclajes de barras corrugadas.

El orden de acoplamiento de los módulos es importante para no desestabilizar el núcleo. Por ello, el orden de montaje será el siguiente: los primeros módulos que se van a montar serán los módulos con función de salón, seguidos por los que son destinados a baños y vestuarios, etc. Siempre en un mismo sentido, rodeando el núcleo. En otras palabras, se tienen que acoplar los módulos de dentro para fuera, y siempre, primero los que estén en contacto directo con el núcleo, para su atornillado con éste y para proporcionar estabilidad y compactar el conjunto.

A medida que se vaya colocando los módulos, mediante una grúa, la unión entre el módulo y el núcleo se realizará igual que una unión entre diferentes módulos contiguos en el mismo plano horizontal, mediante placa de refuerzo en forma de T y tornillos. Dicha placa, puede venir soldada a los perfiles del núcleo de fábrica y servir de replanteo o puede ser soldada in-situ a medida que se monta el núcleo. El atornillado se hará desde dentro del módulo, quitando previamente el revestimiento y volviéndolo a colocar al finalizar.

Una vez colocada la primera planta, se prosigue, en el mismo orden, con las siguientes. Para ello, dado que, salvo los módulos de la planta 20, éstos no disponen de cubierta sino únicamente de un falso techo, por consiguiente, el operario no podrá subirse encima para realizar los acoplamientos y las uniones intermodulares y módulo – núcleo. Para resolver este problema, se va a disponer plataformas metálicas que se colocarán a lo ancho del módulo. Los operarios podrán subirse encima de estas plataformas, realizar las conexiones correspondientes y retirarlas hasta la siguiente planta.

Una vez montada la vigésima planta y realizadas las conexiones de los conductos, tubos, cableado, etc, por dentro de los módulos, se realizan las conexiones con el centro de transformación, red eléctrica, la acometida de agua e instalaciones de telecomunicaciones. A parte de estas instalaciones, se colocan los aparatos pesados tales como la bomba de calor,

la unidad de tratamiento del aire, la caldera y los acumuladores y se realizan las conexiones pertinentes. Se interconectan los conductos y canalizaciones entre plantas de módulos por dentro del núcleo y se instalan los ascensores. Al terminar, se procede al revestimiento interior del núcleo, mediante los paneles GRC o el mismo sistema utilizado para revestir los módulos, siempre según las instrucciones del proveedor o contratando los servicios de los técnicos especializado, y también se reviste, mediante baldosas cerámicas u otros materiales que se crean convenientes, las escaleras metálicas.

Todos estos conductos, canalizaciones, tuberías y cableados irán por dentro de la cámara de aire que se ha dejado entre el revestimiento exterior del módulo y revestimiento interior del núcleo. Es importante que para cada vivienda se instale una arqueta registrable o armario (si las dimensiones lo requieren) dónde se hagan las conexiones de la vivienda con los conductos generales del edificio. Dicha arqueta de conexiones irá en el rellano, en la misma pared contigua de la entrada a la vivienda.

Verificación de las condiciones durante la manipulación y ejecución del módulo

Las situaciones de dimensionado deben englobar todas las condiciones y circunstancias previsibles durante la ejecución y la utilización del módulo en la obra, además de cumplir con las exigencias estructurales de puesta en servicio. Los esfuerzos generados durante el izado con la grúa, cortantes y momentos flectores de signo contrario, en la estructura pueden poner en peligro la integridad tanto del forjado de chapa colaborante como de toda la estructura. Así pues, si se iza por las cuatro esquinas del módulo, en las vigas se generan las reacciones mencionadas anteriormente, que dichas vigas tienen que poder soportar.

Un cálculo rápido demostrará que, efectivamente, las soportan. La estructura del módulo, sin forjado, pesa 5,5 toneladas más las 9,5 toneladas (367 kg/m^2) que pesa el forjado de chapa colaborante de $25,92 \text{ m}^2$ y de 18 cm de espesor (véase catálogo Haircol 59-FC de (Europerfil 2014)) el total hace 15 toneladas (150 kN). Si se supone el caso más simple y por consiguiente el más desfavorable, una viga de 7,2 m izada por los dos extremos y con una carga lineal uniforme a lo largo de la viga de, aproximadamente, 21 kN/m (resultado de dividir 150 kN entre 7,2 m) daría una cortante máxima de 75 kN y un momento flector máximo 135 kNm, inferiores a los 841 kN y 403 kNm de resistencia de diseño, respectivamente (véase Anexos I Estructura, Comprobación tensional de los perfiles del módulo). Por tanto, se cumple satisfactoriamente la condición. Por último, el fabricante del forjado colaborante tiene que asegurar que, éste, aguantará las condiciones de manipulación y ejecución.

Acabados de exterior

Los acabados de exterior de los módulos podrán ser diversos (ver las soluciones propuestas por el fabricante del sistema constructivo que se va a utilizar como cerramiento de fachada) y podrán venir aplicados desde el taller o también se podrán aplicar in-situ. En caso de que vengan ya aplicados desde el taller, es importante protegerlos debidamente antes de la puesta en obra del módulo. Dado que, tanto durante el transporte de los módulos como su posterior montaje, éstos pueden sufrir daños y desperfectos. Se propone tapar el revestimiento con cartón o film de burbujas.

La siguiente imagen, Figura 6.34. Construcción modular. Desde la fabricación a la instalación in situ., representa fielmente, todo el proceso descrito anteriormente. Desde la manufactura hasta su instalación in-situ, pasando por los acabados y revestimientos.

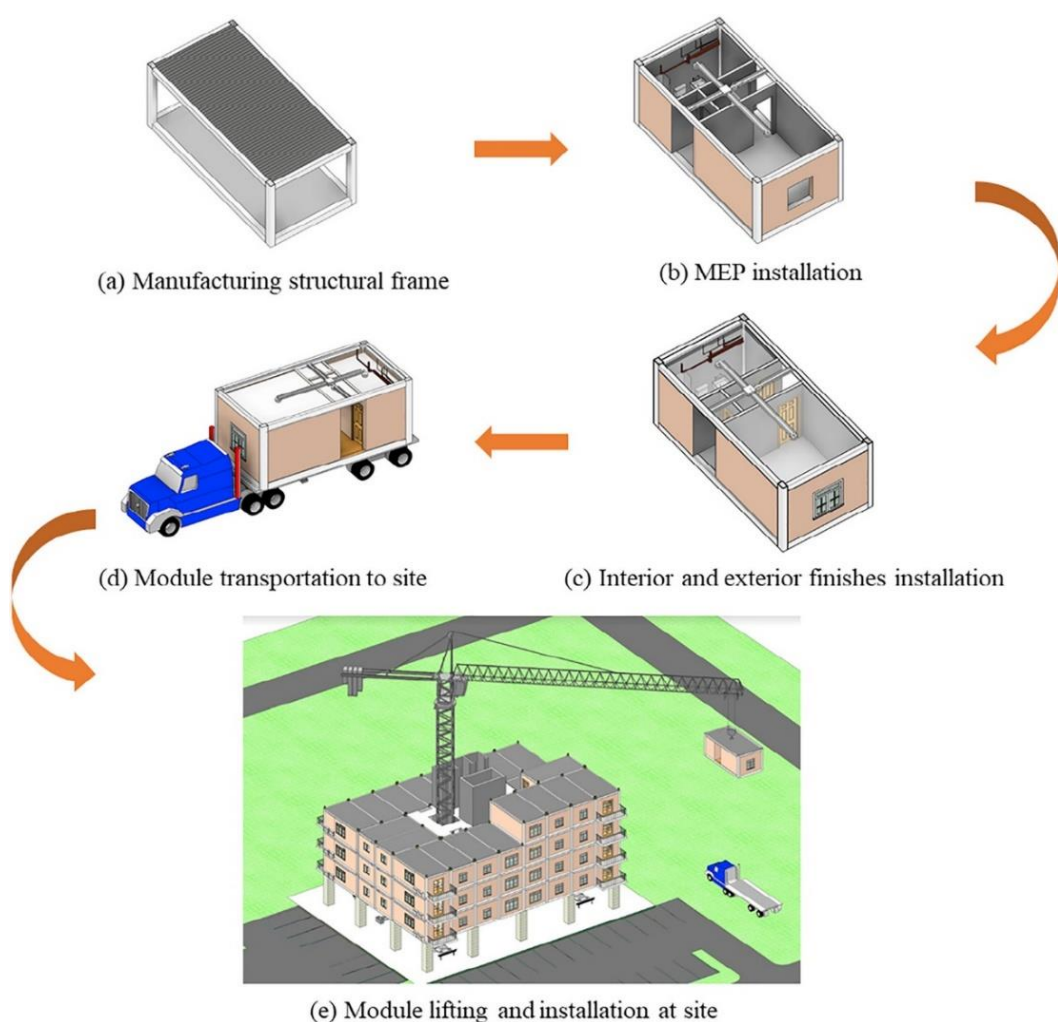


Figura 6.34. Construcción modular. Desde la fabricación a la instalación in situ.

6.6. Estudio económico

Se lleva a cabo un breve estudio económico de los costes teóricos que supondría la fabricación del módulo diseñado en los capítulos anteriores, teniendo en cuenta todas las partes de éste. Es decir, estructura, cerramientos e instalaciones, del dicho módulo. Los costes representados son los Costes Directos (sin IVA incluido) debidos al material, equipo, mano de obra, etc.

Los precios fueron sacados del Banco de Precios de Construcción del ITeC. El presupuesto fue elaborado mediante el programa informático de la casa, TCQ.

PRESUPUESTO						
OBRA	01	FABRICACIÓN DE UN MÓDULO PPVC				
CAPÍTULO	01	ESTRUCTURA				
Nº	CÓDIGO	UM	DESCRIPCIÓN	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
1	E4438115	kg	Acero S355JR según UNE-EN 10025-2, para vigas formadas por pieza simple, en perfiles laminados en caliente serie IPN, IPE, HEB, HEA, HEM y UPN, trabajado en taller y con una capa de imprimación antioxidante, colocado en obra con soldadura (P - 5)	1,67	4.451,97	7.434,79
2	E441J135	kg	Acero S355J2H según UNE-EN 10210-1, para pilares formados por pieza simple, en perfiles huecos laminados en caliente serie redondo, cuadrado y rectangular, trabajado en taller y con una capa de imprimación antioxidante, colocado en obra con soldadura (P - 4)	1,76	1.045,62	1.840,29
3	K44Z552A	m ²	Acero S275JR según UNE-EN 10025-2, para pletina en perfiles laminados en caliente, de 5 mm de espesor, colocado con adhesivo de resinas epoxi sin disolventes, de dos componentes, a una altura ≤ 3 m (P - 23)	96,06	0,16	15,37
4	14LM13AA	m ²	Formación de forjado 18 cm de espesor total, con planchas colaborantes de acero galvanizado, de espesor 1,2 mm, de 200 a 210 mm de paso de malla, para una sobrecarga (uso+permanentes) de 4 a 5 kN/m ² , luz menor de 2,8 m, con una cuantía de 1,5 kg/m ² de armadura AP500 S de acero en barras corrugadas, armadura AP500 T en mallas electrosoldadas de 15x30 cm, 6 y 6 mm de D y una cuantía de 0,147 m ³ /m ² de hormigón para forjados con elementos resistentes industrializados, HA-25/P/10/I de consistencia plástica y tamaño máximo del árido 10 mm, colocado con cubilote (P - 1)	41,64	25,920	1.079,31
TOTAL CAPÍTULO (€)			01.01			10.369,76

PRESUPUESTO						
OBRA	01	FABRICACIÓN DE UN MÓDULO PPVC				
CAPÍTULO	02	CERRAMIENTOS				
Nº	CÓDIGO	UM	DESCRIPCIÓN	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
1	E9557025	m ²	Pavimento técnico interior con pies regulables de acero galvanizado para una altura de 20 a 600 mm, losetas de 60x60 cm y 3 cm de espesor con núcleo de sulfato de calcio, acabado superficial de madera laminada y revestimiento inferior de aluminio, clase 3 según UNE-EN 12825 (P - 10)	124,45	25,920	3.225,74
2	E7CR5221	m ²	Aislamiento antivibratorio para suelos flotantes con amortiguador de caucho de 35 mm de espesor, para una sobrecarga (uso+permanentes) de 2 kN/m2 (P - 8)	4,94	25,92	128,04
3	E8448182	m ²	Falso techo registrable de placas de yeso laminado con acabado liso, 600x 600 mm y 12,5 mm de espesor, sistema desmontable con estructura de acero galvanizado oculto formado por perfiles principales con forma de T invertida de 24 mm de base colocados cada 0,6 m y fijados al techo mediante varilla de suspensión cada 1,2 m, con perfiles secundarios colocados, para una altura de falso techo de 4 m como máximo (P - 9)	38,98	25,92	1.010,36
4	E6526HKJ	m ²	Fachada integral con paneles exteriores de cemento y de placas de yeso laminado por el interior formado por estructura doble reforzada en H con perfilera de plancha de acero galvanizado, con un espesor total del cerramiento de 210 mm, montantes cada 600 mm de 90 mm de ancho y canales de 90 mm de ancho, 2 placas por la cara interior, una estándar (A) de 12,5 mm y la otra hidrófuga (H) de 12,5 mm de espesor, fijadas mecánicamente y aislamiento de placas de lana mineral de vidrio de resistencia térmica $\geq 2,162$ m2.K/W (P - 7)	49,87	36,90	1.840,20
5	E652234Z	m ²	Tabique de placas de yeso laminado formado por estructura sencilla normal con perfilera de plancha de acero galvanizado, con un espesor total del tabique de 98 mm, montantes cada 400 mm de 48 mm de ancho y canales de 48 mm de ancho, 2 placas tipo estándar (A) en cada cara de 12,5 mm de espesor cada una, fijadas mecánicamente y aislamiento de placas de lana mineral de vidrio de resistencia térmica $\geq 1,143$ m2.K/W (P - 6)	42,22	30,60	1.291,93
6	EAJ1H646	u	Balconera de PVC no plastificado, colocada sobre premarco, con dos hojas correderas, para un hueco de obra aproximado de 210x220 cm, clasificación mínima 3 de permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación mínima 3A de estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación mínima C4 de resistencia al viento según UNE-EN 12210, con caja de persiana, guías y persiana de PVC (P - 11)	773,41	1,00	773,41
7	1A221331	m ²	Puerta interior de madera, barnizada, con puerta de hojas batientes madera de roble, de una hueco de paso aproximado de 70x200 cm, con premarco de tabique para puerta de madera, forrado de mardo, hoja batiente y tapajuntas de madera. m2	170,30	1,40	238,42

Nº	CÓDIGO	UM	DESCRIPCIÓN	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
			de hueco de paso (P - 2)			
8	EAQACD86	u	Hoja batiente para puerta de entrada, de madera para pintar, de 35 mm de espesor, con moldura y de madera chapada, de 80 cm de ancho y de 210 cm de altura (P - 12)	225,62	1,00	225,62
9	EC121404	m²	Vidrio luna incolora de espesor 4 mm, colocado de con perfiles conformados de neopreno sobre aluminio o PVC (P - 13)	15,61	4,62	72,12
TOTAL CAPÍTULO (€)			01.02			8.805,84

PRESUPUESTO

OBRA	01	FABRICACIÓN DE UN MÓDULO PPVC				
CAPÍTULO	03	INSTALACIONES				
Nº	CÓDIGO	UM	DESCRIPCIÓN	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
1	EE51PQ10	m²	Formación de conducto rectangular de lana mineral de vidrio (MW), según UNE-EN 14303, de espesor 25 mm, resistencia térmica $\geq 0,78125$ m².K/W, con recubrimiento exterior de y recubrimiento interior de tejido de vidrio negro, montado empotrado en el falso techo (P - 14)	19,42	23,31	452,68
2	EEJ7MPJH	u	Fan-coil del tipo conductos horizontal con ventilador centrífugo, para trabajar en sistemas de distribución de agua de 4 tubos, de 11,5 a 13 kW de potencia frigorífica máxima y 13 a 15 kW de potencia calorífica máxima, con una presión disponible de 180 a 200 Pa, con alimentación monofásica de 230 V, con control electromecánico, y con bandeja de recogida de condensados y bomba de desagües, colocada (P - 15)	1.880,72	0,25	470,18
3	EEK21737	u	Rejilla de impulsión o retorno, con una hilera de aletas orientables horizontales, de aluminio anodizado plateado, de 200x100 mm, de aletas separadas 20 mm, de sección recta y fijada en el marco (P - 16)	20,74	2,40	49,78
4	EG2A3515	m	Canal aislante de PVC, con 1 tapa para distribución, de 40x 90 mm, con 1 compartimento, de color blanco, montada sobre paramentos (P - 19)	9,31	9,35	87,05
5	1G22A301	u	Instalación eléctrica interior de un piso de 100 m² con grado de electrificación elevado e 8 circuitos, sin ayudas de albañilería (P - 3)	2.561,21	0,25	640,30
6	EFB48751	m	Tubo de polietileno reticulado de 25 mm de diámetro nominal exterior y 2,3 mm de espesor, de la serie 5 según UNE-EN ISO 15875-2, conectado a presión y colocado superficialmente (P - 17)	5,30	7,50	39,75
7	EFQ3G43K	m	Aislamiento térmico de espuma elastomérica con revestimiento de PVC para tuberías que transportan fluidos a temperatura entre -50°C y 105°C, para tubo de diámetro exterior 10 mm, de 9 mm de espesor, colocado superficialmente con	4,06	3,75	15,23

Nº	CÓDIGO	UM	DESCRIPCIÓN	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
grado de dificultad bajo (P - 18)						
8	GFBA6585	u	Derivación de polietileno inyectada, de densidad media de 110 mm de DN, serie SDR 11, según UNE-EN 1555-3 con ramal a 90° de 110 mm de DN, para soldar, soldada y colocada en el fondo de la zanja (P - 20)	30,93	1,00	30,93
9	GFBC6528	u	Cono de reducción de polietileno, inyectado, de densidad media, de 110 mm a 63 mm de DN serie SDR 11, según UNE-EN 1555-3, para soldar, soldado y colocado en el fondo de la zanja (P - 22)	28,80	2,00	57,60
10	GFBBC685	u	Codo de polietileno de 45°, inyectado, de densidad media, de 125 mm de DN, serie SDR 11, según UNE-EN 1555-3, para soldar, soldado y colocado en el fondo de la zanja (P - 21)	29,53	2,00	59,06
TOTAL CAPÍTULO (€)			01.03			1.902,56

Además, como un capítulo adicional, se añade el coste de la formación de las cubiertas planas transitables calientes. Este capítulo únicamente estará compuesto por dos partidas, la formación del forjado y la formación de cubierta.

PRESUPUESTO						
OBRA	02	FABRICACIÓN DE UN MÓDULO PPVC				
CAPÍTULO	04	CUBIERTA				
Nº	CÓDIGO	UM	DESCRIPCIÓN	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
1	14LM13AA	m ²	Formación de forjado 18 cm de espesor total, con planchas colaborantes de acero galvanizado, de espesor 1,2 mm, de 200 a 210 mm de paso de malla, para una sobrecarga (uso+permanentes) de 4 a 5 kN/m ² , luz menor de 2,8 m, con una cuantía de 1,5 kg/m ² de armadura AP500 S de acero en barras corrugadas, armadura AP500 T en mallas electrosoldadas de 15x30 cm, 6 y 6 mm de D y una cuantía de 0,147 m ³ /m ² de hormigón para forjados con elementos resistentes industrializados, HA-25/P/10/I de consistencia plástica y tamaño máximo del árido 10 mm, colocado con cubilote (P - 1)	41,64	25,920	1.079,31
2	1511HSF2	m ²	Cubierta transitable, formación de pendientes con hormigón de 150 kg/m ³ , aislamiento con placas de poliestireno extruido (XPS) de espesor 70 mm, capa separadora, impermeabilización con una membrana de dos láminas de densidad superficial 7.2 kg/m ² LO-40-FP de 130 g/m ² y acabado de azotea con pavimento formado por dos capas de rasilla cerámica	77,84	25,92	2.017,61
TOTAL CAPÍTULO (€)			01.04			3.096,92

RESUMEN PRESUPUESTO I (MÓDULOS INTERMEDIOS)			
			IMPORTE
Capítulo	01.01	Estructura	10.369,76
Capítulo	01.02	Cerramientos	8.805,84 €
Capítulo	01.03	Instalaciones	1.902,56 €
Obra	01	Presupuesto (Costes Directos)	21.078,16 €

Tabla 6.51. Resumen de los presupuestos de los módulos de la primera planta e intermedias. Fuente: BEDEC

RESUMEN PRESUPUESTO II (MÓDULOS FINALES)			
			IMPORTE
Capítulo	02.01	Estructura	10.369,76
Capítulo	02.02	Cerramientos	8.805,84 €
Capítulo	02.03	Instalaciones	1.902,56 €
Capítulo	02.04	Cubierta	3.096,92 €
Obra	02	Presupuesto (Costes Directos)	24.175,08 €

Tabla 6.52. Resumen de los presupuestos de los módulos de la última planta. Fuente: BEDEC

Como se puede apreciar en ambos casos, el capítulo de la estructura es el que más gasto representa, más concretamente la partida de formación de las vigas del módulo. Con una medición de 4.451,97 kg de acero y un coste de 7.434,79 €, esta partida representa el 71,7% del Capítulo 01.01 y, además, el 35,3% y el 30,8% del coste de la Obra 01 y Obra 02, respectivamente.

Coste Directo del edificio debido a la partida de los módulos				
Tipo de módulo	Nº de módulos	Coste (€/módulo)	Coste (€/m ²)	Importe
Módulos intermedios	342	21.078,16	813,20	7.208.730,72 €
Módulos finales	18	24.175,08	932,68	444.871,44 €
COSTE EDIFICIO TOTAL				7.653.602,16 €

Tabla 6.53. Coste Directo de todo el grupo de módulos del edificio. Fuente: Elaboración propia

Se puede establecer un coste promedio de módulo igual a 21.260,00 € y con ello establecer el precio de los dos tipos de vivienda que se diseñaron.

Costes Directos de las viviendas				
Tipo de vivienda	Superficie útil (m ²)	Nº módulos	Coste (€/módulo)	Importe
Tipo 1	100,8	4	21.260,00	85.040,00 €
Tipo 2	126	5		106.300,00 €

Tabla 6.54. Coste Directo de cada tipo de vivienda. Fuente: Elaboración propia

Economía de escala

Uno de los impulsores clave del ahorro de costes proviene de la economía de escala. Esto requiere fábricas lo suficientemente grandes como también una producción suficiente para garantizar la repetibilidad, el aprendizaje y el ahorro de volumen en las adquisiciones.

De acuerdo al informe de “*Modular constructions: from projects to products*” (Bertram et al. 2019) las entrevistas que se realizaron indican que las empresas logran un aumento rápido y sustancial de la productividad cuando comienzan a producirse aproximadamente 1,000 unidades por año. Se alcanza otro incremento, típicamente asociado con otro aumento del 5% en la productividad, en aproximadamente 5,000 unidades por año. Como se puede apreciar en Figura 6.35, que relaciona la automatización de la producción y el aumento de la productividad en frente a construcción tradicional in situ, una mayor automatización permitirá un aumento productivo de hasta el 80%. Es decir, una reducción del 80% en el volumen de trabajo, lo que significa mayor ahorro económico.

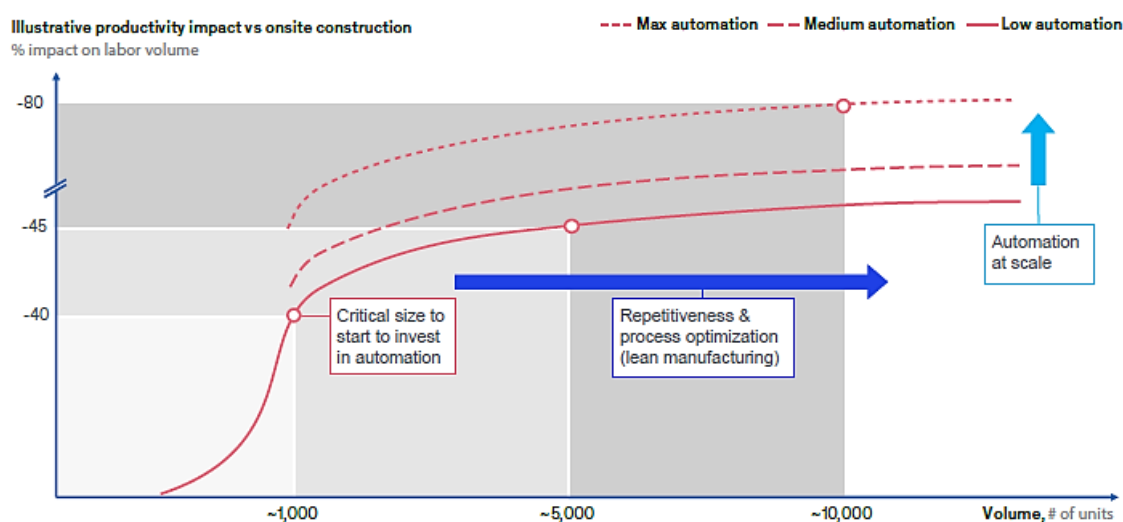


Figura 6.35. Impacto productivo vs construcción in situ. Fuente: (Bertram et al. 2019)

El dilema fundamental al que se enfrentan muchos proveedores modulares en esta etapa de su evolución es si habrá suficiente demanda, dentro de sus límites geográficos, para justificar el aumento de escala de sus plantas y/o el aumento del número de sus fábricas productivas. Lo cual significa una gran inversión.

Una posible solución podría darse mediante la subcontratación de fábricas de otros territorios, en casos de desbordamiento en la capacidad productiva del taller principal de la empresa. Esta solución de múltiples puntos de fabricación permite la optimización de la utilización de la capacidad, asegurando que la fábrica de la empresa desarrolladora de los módulos esté siempre al 100% de utilización, donde también se puede buscar reducir aún más los costes

mediante la mejora continua. Con lo cual, no haría falta realizar grandes aumentos de escala en las plantas de fabricación.

Maximizando los beneficios de productividad

El enfoque modular volumétrico ofrece el potencial para la máxima eficiencia y ahorro de tiempo, pero por contrapartida aumentan los costes de transporte y limitaciones de tamaño. El coste aproximado del transporte de unos 250 kilómetros de un panel prefabricados 2D es de 8 \$/m² (7,27 €/m²), pero casi 45 \$/m² (40,87 €/ m²) para el equivalente 3D, según los datos proporcionados por (Bertram et al. 2019).

Estos factores hacen que el módulo volumétrico sea más adecuado para hoteles, hostales o viviendas asequibles. Es decir, para proyectos con un alto nivel de repetibilidad. Cabe señalar que la repetibilidad no significa que todos los productos deben tener el mismo aspecto. Sino, una variedad de módulos estandarizados se pueden juntar de manera diferente para producir un resultado final personalizado.

La siguiente Figura 6.36 muestra que la construcción mediante módulos volumétricos reduce hasta el 50% del tiempo necesario en la construcción de un apartamento, frente el que sería necesario para en la construcción tradicional.

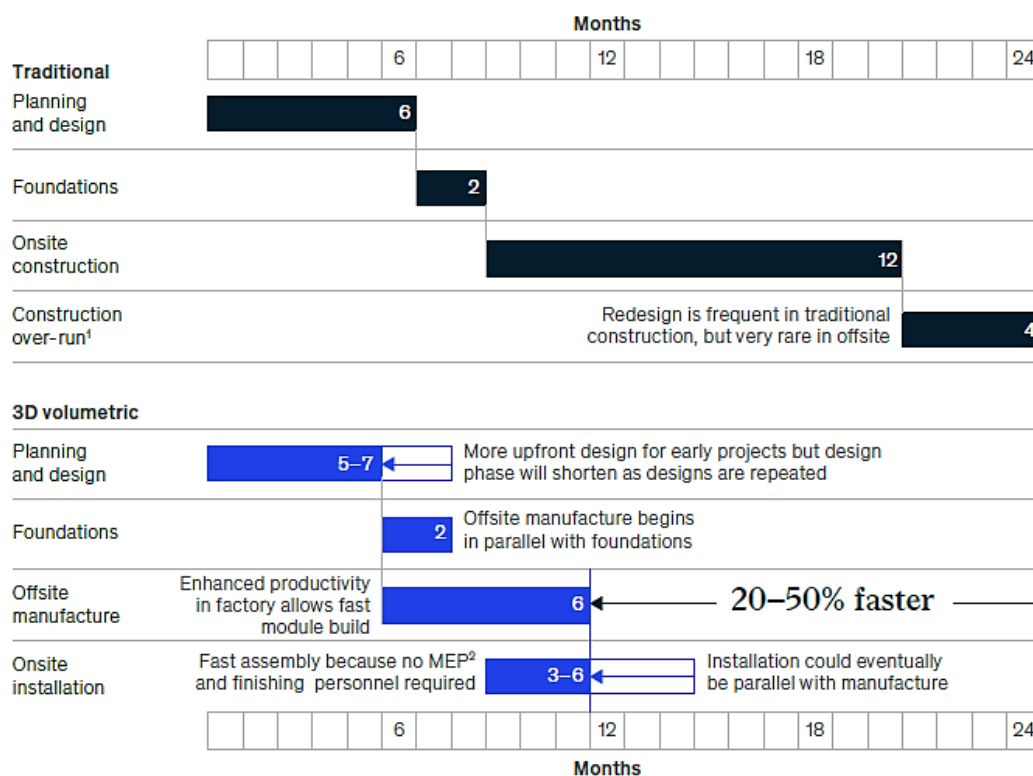


Figura 6.36. Duración de constructiva de un proyecto de apartamentos mediante la forma tradicional vs modular. Fuente: (Bertram et al. 2019)

Conclusiones

Este proyecto, se divide en tres grandes partes. El primer gran bloque consiste en analizar los sistemas de construcción prefabricada y establecer un criterio comparativo que dé respuesta a la necesidad de construir eficientemente. Se entiende por construcción eficiente aquella que minimice la utilización de los recursos, ya sean monetarios, de personal o energético y maximice el beneficio aportado, ya sea en forma monetaria o en forma de tiempo en finalizar la construcción. Lo que ha llevado a dar con la solución que mejor responde a la premisa de la eficiencia, y es la construcción industrializada de módulos volumétricos de acero, conocida como PPVC, es decir Construcción Volumétrica Prefabricada y Prefinalizada. El segundo gran bloque, consiste en llevar a la práctica este sistema edificando edificio residencial. Y por último, el tercer bloque reside en diseñar la instalación adecuada para dicho edificio.

Ha quedado demostrado que la construcción de edificios de gran altura mediante módulos volumétricos de acero es viable tanto económicamente como estructuralmente. Mediante el programa informático *Robot Structural Analysis*, se consiguió dimensionar una estructura para el módulo con unos perfiles de dimensiones aceptables. El módulo diseñado cumple con las normas, reglas y directrices que tiene que verificar cualquier vivienda habitable. Por consiguiente, con estos módulos el usuario, al adquirirlos, podrá diseñar su propia vivienda unifamiliar o remodelar, ampliándola, una vivienda existente. El comprador, o usuario, de estos módulos puede ser tanto un particular como una constructora. Ésta última, si desea podrá levantar un edificio hasta 20 plantas de altura sin problema alguno, además al ser un edificio de grandes dimensiones, que requerirá una cantidad considerable de módulos, y al ser éstos industrializados módulos, se podrá personalizar a y las necesidades de la empresa constructora. En caso, si así lo requiere el proyectista, estos módulos se podrían fabricar de unas dimensiones más modestas, por ejemplos 5 x 2,5 x 3m, con lo cual se reducirían los problemas de transporte y un camión tráiler cualquiera (no especial) sería capaz de transportarlos sin la necesidad de una autorización previa. Además, mejoraría el estado tensional y de servicio del edificio que se vaya a montar, dado a que los vanos son más pequeños.

Además, se ha visto que con el módulo diseñado se puede levantar un edificio de hasta 6 plantas, si la necesidad de un estructural resistente. Este hecho es más importante de lo que parece, ya que de este modo aumenta considerablemente la flexibilidad constructiva. Dado que será posible levantar un bloque de viviendas, oficinas, hoteles u otros establecimientos en un periodo de tiempo muy breve y dotar el edificio carácter temporal.

El coste directo de fabricación de un módulo tipo es de 21.260,00 €. El coste directo de todos los módulos que se necesitaría para el edificio es de 7.653.602,16 de euros. El metro cuadrado de estos módulos resulta entre 813,20 y 932,68 €, algo caro respecto lo que

supondría una construcción in situ, pero eso ya se dedujo y se analizó en el capítulo 6 de este documento, donde se explica que al reducir el tiempo de construcción y con ello empezar la explotación del edificio antes, se obtienen mayores beneficios. Además, se tiene que tener en cuenta que el estudio económico se hizo a partir de un banco de construcción in situ. Es decir, estos son los costes que supondría si el módulo fuese montado en la obra misma y no en un taller especializado y altamente industrializado, donde obviamente se reducirían los costes.

A lo largo del proyecto, se ha topado con diferentes desafíos y problemáticas a lo que concierne la construcción de gran altura, regidas por las necesidades tales como la de un núcleo resistente para poder construir más de 5 plantas, uniones capaces de transmitir y resistir las cargas aplicadas siendo a la vez fáciles de colocar, para un apilamiento rápido y limpio. Otra dificultad que surgió fue debida al tamaño del propio módulo y por consiguiente su transporte, pero esto se soluciona pidiendo la autorización pertinente al órgano competente en materia de tráfico. El transporte por carretera de estos módulos se catalogaría como transporte especial genérico, lo cual no supondría mayores problemas para el transporte y distribución de los módulos por carretera.

Por otro lado, la siguiente corriente de dificultades vino de la mano de las instalaciones. Como ya se vino mencionando, se ha utilizado la centralización de los servicios de climatización y generación de ACS como premisa de la eficiencia energética. Para un edificio residencial de semejante forma y tamaño, conlleva a demandas eléctricas, de climatización y ACS elevadas, difíciles de dimensionar. La potencia eléctrica demandada requiere una línea general de alimentación particular, secciones de fase elevadas (no contempladas en el REBT), o por lo contrario la división de dicha línea en varias (la opción escogida para este proyecto). Pese a utilizar unos cerramientos que minimizan la transmitancia térmica, la gran cantidad de viviendas da lugar a una demanda elevada de refrigeración y calefacción, si estas son centralizadas, por consiguiente, se acaba empleando una bomba de calor y una unidad de tratamiento de aire de dimensiones considerables. Por último, la generación de ACS tiene dos vertientes. Por un lado, la obligatoriedad de la contribución solar mínima (60% en este caso) en la generación de ACS, lo que conlleva a la ocupación prácticamente total de la cubierta, al ser un edificio de pequeña superficie en relación al volumen. El poco espacio restante no permite, además, la instalación de los paneles fotovoltaicos que realmente generen una contribución significativa. Por otro lado, volviendo a la problemática de la gran altura y la generación de ACS, no se pueden conseguir las presiones adecuadas en todas las plantas con una única distribución, llegando incluso a necesitar grupos de presión independientes.

Teniendo en cuenta todas las problemáticas descritas, a algunas de ellas, no se les pudo dar solución alguna, ya sea por falta de tiempo o porque en sí mismos representan un proyecto entero, por lo cual quedan fuera del alcance de este documento. Al desconocer la existencia de dichos problemas no se pudo planificar el proyecto adecuadamente con tal de llevar a cabo todos los objetivos iniciales. Por tanto, se deja como iniciativa para los estudios futuros.

Agradecimientos

En primer lugar, dar las gracias a mi tutor, Pablo Pujadas, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y por haberme guiado durante todo el proceso.

Además, agradecer a mis compañeros de departamento del ITeC, por todas las dudas que me resolvieron.

Con este proyecto, termina una gran e importante etapa de mi vida y por ello, dedico este trabajo a todos mis seres queridos, familiares y compañeros, que han estado a mi lado durante todos estos años. Agradezco mucho vuestro apoyo y cariño.

Y termino con una cita:

“Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes”

Isaac Newton

Bibliografía

- Alex Hyams, Ed McCann, Hugh Ferguson. 2018. "Construction Methods: Modular." [En línea] (<https://www.building.co.uk/data/construction-methods-modular/5094760.article>).
- Antonov, A. A., M. V. Molodtsov, and V. E. Molodtsova. 2016. "Framing Systems in Residential Construction." *Procedia Engineering* 150:2138–45.
- Arnabat, Idoia (Caloryfrio). 2008. "Cálculo de Frigorías Del Aire Acondicionado." *Aire Acondicionado Doméstico*. [En línea] (<https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-acondicionado-domestico/calculo-de-frigorias-aire-acondicionado.html>).
- Arnabat, Idoia (Caloryfrio). 2015. "Aire Acondicionado Por Conductos." *Aire Acondicionado Comercial*. [En línea] (<https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-acondicionado-comercial/aire-acondicionado-por-conductos-ventajas-de-su-instalacion.html>).
- Bertram, Nick; Steffen; Fuchs, Jan; Mischke, Robert; Palter, Gernot; Strube, and Jonathan Woetzel. 2019. *Modular Construction : From Projects to Products*.
- Blanco Álvarez, José Luis. 2003. "Estudio Relativo a La Construcción Modular." Tesina [En línea] (<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6198>). UPC.
- Calavera, J. 2000. *Cálculo de Estructuras de Cimentación*. 4ª Edición. INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).
- Cao, Xinying, Xiaodong Li, Yimin Zhu, and Zhihui Zhang. 2015. "A Comparative Study of Environmental Performance between Prefabricated and Traditional Residential Buildings in China." *Journal of Cleaner Production* 109:131–43.
- CTE-DB-HE. 2017. *Código Técnico de Edificación. Documento Básico HE - Ahorro de Energía*. Ministerio de Fomento. Real Decreto 314/2006. [En línea] (<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte.html>).
- CTE-DB-HS. 2017. *Código Técnico de Edificación. Documento Básico HS - Salubridad*. Ministerio de Fomento. Real Decreto 314/2006. [En línea] <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte.html>.
- CTE-DB-SE-A. 2008. *Código Técnico de Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural - Acero*. Ministerio de Fomento. Real Decreto 314/2006. [En línea] (<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte.html>).
- CTE-DB-SE-AE. 2009. *Código Técnico de Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones En La Edificación*. Ministerio de Fomento. Real Decreto 314/2006. [En línea] (<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte.html>).
- CTE-DB-SE. 2009. *Código Técnico de Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural*. Ministerio de Fomento. Real Decreto 314/2006. [En línea] (<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte.html>).

- Departamento Técnico de Climatización (Cofrico). 2018. "Sistemas de Climatización Centralizada y Sus Ventajas." *Consejos Técnicos*. [En línea] (<https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/sistemas-de-climatizacion-centralizada-y-sus-ventajas-2/>).
- Diego Gómez Muñoz. 2008. "Estudio Comparativo Entre Distintas Metodologías de Industrialización de La Construcción de Viviendas." Tesina [En línea] (<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5636>). UPC.
- Dineshkumar, N. and P. Kathirvel. 2015. "Comparative Study on Prefabrication Construction with Cast In-Situ Construction of Residential Buildings." *IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* 2(4):527–32.
- Dirección General de Tráfico. 2008. "Reglamentación Sobre Vehículos Pesados, Prioritarios, Especiales, de Transporte de Personas y Mercancías." 61(12):1367–79.
- Europafil. 2014. "Catálogo de Perfil Forjado Colaborante Haircol 59 FC." 1–5. [En línea] (<http://europafil.com/newweb/resources/img/productos/ficha/pmfcac059-ft140407-haircol-59-es.pdf>).
- Fomento, Ministerio de. 2011. *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*. Real Decreto 1247/2008. [En línea] (<https://www.fomento.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-castellano>).
- Hamkhiyan, Taron. 2016. "Análisis Comparativo Térmico, Higrotérmico y Medioambiental de Las Diferentes Soluciones Constructivas de Cubierta En El Clima Mediterraneo." [En línea] (<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/97168>). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona - UPC.
- Hernández Olivares, Francisco, Equipo de investigación, Jaime Santa Cruz Astorqui, and Mercedes del Río Merino. 2002. "Paneles De GRC Para La Viviendas De Bajo Coste Y Otras Aplicaciones Para Atender Determinadas Situaciones De Emergencia Y Catástrofe." (1):1–95.
- IDAE. 2010. *Guía Técnica 8. Agua Caliente Sanitaria Central*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. [En línea] (<https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-agua-caliente-sanitaria-central>). Madrid.
- Idescat. 2019. "Valor Añadido Bruto. Por Sectores." *Generalitat de Catalunya. Institut de Estadística de Catalunya*. Anuario estadístico de Catalunya. [En línea] (<https://www.idescat.cat/indicadors/?id=ue&n=10133&lang=es>).
- IETcc, EPCO, AICIA. n.d. *Catálogo de Elementos Constructivos Del CTE*. Vol. 3. [En línea]
- Inarquía. 2019. "Ventajas e Inconvenientes de Las Calderas de Biomasa." [En línea] (<https://inarquia.es/ventajas-e-inconvenientes-de-las-calderas-de-biomasa>).
- INSSBT, O.A., M. P. 2018. "Sinistralidad Laboral Abril 2017 - Marzo 2018." *Departamento de Investigación e Información. Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar En El Trabajo (INSSBT), O.A., M.P.* Retrieved ([https://www.insst.es/Observatorio/3/Sinistralidad laboral en cifras/Informes interanuales/Avan_abr17_mar18.pdf](https://www.insst.es/Observatorio/3/Sinistralidad%20laboral%20en%20cifras/Informes%20interanuales/Avan_abr17_mar18.pdf)).

- ITeC. 2018. *Tabiquería Seca Con Placa de Fibra-Yeso Fermacell*. DAU 17/103. [En línea] (<https://itec.cat/serveis/certificacio/dau/emesos/>)
- ITeC. 2019. *Fachada Integral Fermacell Powerpanel H2O*. DAU 14/082. [En línea] (<https://itec.cat/serveis/certificacio/dau/emesos/>)
- Jellen, A. C. and A. M. Memari. 2013. "The State-of-the-Art Application of Modular Construction to Multi-Story Residential Building." *1st Residential Building Design & Construction Conference* 284–93.
- Johnson, Timothy Werner. 2006. "Comparison of Environmental Impacts of Steel and Concrete as Building Materials Using the Life Cycle Assessment Method By." *Environmental Engineering*.
- Lara, Gerardo Tocados. 2015. "Proyecto de La Instalación Solar Térmica Para El Suministro de ACS Para Un Edificio de Viviendas En Sant Adrià de Besòs." UPC.
- Lawson, R. M. and R. G. Ogden. 2008. "'Hybrid' Light Steel Panel and Modular Systems." *Thin-Walled Structures* 46(7–9):720–30.
- Lawson, R. M. and J. Richards. 2010. "Modular Design for High-Rise Buildings." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*.
- Lawson, R. Mark, Ray G. Ogden, and Rory Bergin. 2012. "Application of Modular Construction in High-Rise Buildings." *Journal of Architectural Engineering*.
- Liew, J. Y. R., Z. Dai, and Y. S. Chua. 2018. "Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-Rise Buildings." (Asccs):59–65.
- Ministerio de Fomento. 2016. "Subdirección General de Explotación y Gestión de Red."
- Ngo, Tuan, Robert Crawford, Ranjith Gammampila, Lu Aye, and Priyan Mendis. 2009. *Embodied Energy Analysis of Prefabricated Reusable Building Modules for a Multi-Residential Building*.
- Okodi-Iyah, Edima Yuyu. 2012. "A Comparative Evaluation of the Environmental Impact of Prefabrication versus Conventional Construction in UAE ' s Construction Industry By EDIMA YUYU OKODI-IYAH Dissertation Supervisor :"
- PlanasArk. 2017. "Catálogo Manual de Proyectos GRC." 23.
- Prat, Jaume. 2017. "Aires de Cambio En El Sector de La Construcción." *Construmat 2017*. [En línea] (<http://www.construmat.com/news/-/noticias/detalle/10085501/articulo-aires-de-cambio-en-el-sector-de-la-construccion-por-jaume-prat>).
- Rahman, Mizanoor and Habibur Rahman Sobuz. 2018. "COMPARATIVE STUDY OF IPS & PPVC PRECAST SYSTEM-A CASE STUDY OF PUBLIC HOUSING BUILDINGS PROJECT IN SINGAPORE." (February):1–12.
- Ramaji, Issa J. and Ali M. Memari. 2013. "Identification of Structural Issues in Design and Construction of Multi-Story Modular Buildings." *1st Residential Building Design & Construction Conference* 294–303.

- REBT. 2019. *Reglamento Electronico Para Para Baja Tension e Instrucciones Tecnicas Complementarias*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Real Decreto 842/2002. [En línea] (http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/Si_Ambito.aspx?id_am=76).
- Sara Khalifa y otros. 2018. "Defining the characteristics of prefabricated architecture as an alternative sustainable construction approach"
- Solzaima. 2017. "Soluciones de Calefacción a Biomasa. Calefacción Central." [En línea] (http://solzaima.es/storage/pdf/SZM_catalogo%20geral%202017_Aq.Central%20ES_web.pdf).
- UK National Audit Office. 2005. "Using Modern Methods of Construction to Build Homes More Quickly and Efficiently." (November):1–29.
- Wadel, Gerardo, Jaume Avellaneda Tutor, Albert Cuch, and Construcciones Architect. 2009. "LA CONSTRUCCIÓN MODULAR LIGERA APLICADA A LA VIVIENDA." 1–13.
- Zhang, Shan, Yuhong Pan, Ning Li, and Qi Sun. 2014. "A Comparative Study of the Direct Costs between Prefabricated Housing System and the Traditional Construction Technology- A Case Study of Precast Concrete Wall Panel." in *Proceedings of the 18th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*.